



**Jarmo Julku**

## **BETONISEN SILTAKANNEN EPOKSITIIVISTYKSEN LAADUNHALLINTA**

Diplomityö, joka on jätetty opinnäytteenä tarkastettavaksi  
diplomi-insinöörin tutkintoa varten.

Espoossa 30.5.2016

Valvoja: Professori Risto Kiviluoma Aalto-yliopisto

Ohjaaja: DI Jarmo Saarinen Vahanen Rakennusfysiikka Oy

---

**Tekijä** Jarmo Julku

---

**Työn nimi** Betonisen siltakannen epoksitiivistyksen laadunhallinta

---

**Koulutusohjelma** Rakenne- ja rakennustuotantotekniikan koulutusohjelma

---

**Pää-/sivuaine** Rakennusmateriaalit ja rakennusfysiikka **Koodi** Rak.thes

---

**Työn valvoja** Professori Risto Kiviluoma

---

**Työn ohjaaja** DI Jarmo Saarinen, Vahanen Rakennusfysiikka Oy

---

**Päivämäärä** 30.5.2016

**Sivumäärä** 67+7

**Kieli** Suomi

---

### Tiivistelmä

Suomalaisilla betonikantisilla silloilla kaksinkertainen kumibitumikermieristys on yleisin vedeneristysratkaisu. Liikenneviraston ohjeiden mukaan suurin osa betonisista siltakansista tulee käsitellä epoksitiivistyksellä ennen vedeneristyskermien asennusta. Epoksitiivistys koostuu kahteen kertaan levitettävästä tiivistysepoksikerroksesta, joiden väliin tulee sirotehiekkä.

Kumibitumikermieristettä ja epoksitiivistystä on käytetty eri maissa onnistuneesti. Suomessa ratkaisua ei ole saatu toimimaan täysin luotettavasti. Pintarakenteiden irtoaminen vesihöyryn vaikutuksesta (kupliminen) aiheuttaa vedeneristeen vaurioitumisen, mikä voi huomattavasti lyhentää sillan korjausväliä. Työssä tutkittiin betonisen siltakannen epoksitiivistystä, pintarakenteita ja kuplanmuodostumista vedeneristyskermien alle kirjallisuusselvityksen perusteella. Liikenneviraston käyttämien laadunvarmistusmittauksiin perustuvien uudiskohteissa suoritettujen kenttäkokeiden perusteella perhdyttiin mittausten menetelmiin ja arvioitiin mittausten tarpeellisuutta.

Kenttäkokeet suoritettiin viidellä uudissillalla ennen vedeneristystöiden aloittamista epoksitiivistystöiden yhteydessä. Kenttäkokeet koostuivat laadunvarmistusmittauksiin perustuvista mittauksista, jotka suoritettiin jokaisen sillan kannella kolmessa eri mitta-alueessa. Laadunvarmistusmittausten lisäksi suoritettiin betonipinnan tartuntavetolujuuden koestus, laajemmat betonin absoluuttisen kosteuden mittaukset ja betonin suhteellisen kosteuden mittaaminen. Lisäksi siltakannen betonista valmistettiin ohuthienäyteitä ja ohuthieistä tehtiin huokosanalyysit.

Tutkimuksessa ei löydetty selvää syytä kuplimiselle tai epoksitiivistyksen epäjatkuvuuskohtien synnylle, mutta pystyttiin määrittelemään kuplimisen estämisen kannalta tärkeitä yksityiskohtia jatkotutkimuksiin. Kenttäkokeiden tulosten perusteella siltakannen betonin absoluuttisen kosteuden mittaaminen kuivatuspunnitusmenetelmällä vaikuttaa epäluotettavalta. Suhteellisen kosteuden mittaaminen näytepalamenetelmällä mahdollistaisi tarkemman betonin kuivumisen tarkastelun, mutta se vaatisi vielä tarkempaa tutkimusta ja epoksin kosteusraja-arvojen määrittämistä. Siltakansien betonin huokosanalyysissä havaittiin, että betonin kokonaisilmamäärä oli huomattavasti suurempi kuin suurin sallittu ohjeellinen kokonaisilmamäärä ja aiemmissa tutkimuksissa todettu suurin sallittu kokonaisilmamäärä.

---

**Avainsanat** Epoksi, epoksitiivistys, tiivistysepoksi, silta, sillan pintarakenne, vedeneristys, laadunvarmistus

---

---

**Author** Jarmo Julku

---

**Title of thesis** Quality management of epoxy sealer on concrete bridge deck

---

**Degree programme** Structural Engineering and Building Technology

---

**Major/minor** Building Materials and Physics

---

**Code** Rak.thes

---

**Thesis supervisor** Professor Risto Kiviluoma

---

**Thesis advisor** M. Sc. Jarmo Saarinen, Vahanen Rakennusfysiikka Oy

---

**Date** 30.5.2016

---

**Number of pages** 67+7

---

**Language** Finnish

---

**Abstract**

The most common water proofing solution on Finnish concrete bridge decks is of two-layer bitumen sheets. According to the guidelines of the Finnish Transportation Agency majority of the concrete bridge decks must be treated with epoxy sealer before installation of bitumen sheets. Sealer epoxy treatment consists of two layers of sealing epoxy and granule sand between the layers.

Two-layer bitumen sheets with epoxy sealer water proofing solution is used in other countries successfully. In Finland this solution does not work completely reliably. The surface structures may disengage the concrete surface due to the pressure of water vapor in the concrete (blistering). Blistering may shorten bridges repair interval significantly. This thesis studies epoxy sealer, surface structures, and formation of blister under the water-proofing membrane on concrete bridge deck with literature survey. The field tests based on the quality assurance tests, used by the Finnish Transportation Agency, were done in bridge construction sites to familiarize with the quality assurance tests and to estimate the necessity of these tests.

The field tests were performed at five bridge construction sites before the water proofing installation during the epoxy sealer work phases. The field tests were based on quality assurance tests and were executed on all bridges at three test area. In addition to the assurance quality tests, adhesive strength in tension test, more extensive absolute humidity tests of concrete, and relative humidity test of concrete were performed. Thin section specimens of the concrete were prepared for concrete pore analysis.

The study was not able to identify any specific reason for blistering or discontinuity in epoxy sealing. However, some details for success were defined for further research. According to the results of the field tests the determination of the water content by drying seems an unreliable measurement system of absolute humidity at bridge decks. The specimen method of relative humidity test enables more detailed monitoring for concrete drying but needs further research and defining the boundary values. In the pore analysis it was observed that the total air content of concrete was much higher than the standard air content and maximum air content defined in prior research.

---

**Keywords** Epoxy, epoxy sealer, sealing epoxy, bridge, bridge surface structures, water-proofing, quality assurance

---

## Alkusanat

Tämä diplomityö on tehty Vahanen Rakennusfysiikka Oy:n ohjauksessa Aalto-yliopiston Insinööritieteiden korkeakoulun Rakennustekniikan laitokselle.

Kiitän työhön osallistuneita henkilöitä: Timo Tirkkonen ja Pekka Siitonen (Liikennevirasto), Ari Mantila (Betoniteollisuus ry), Mikko Ahtola (Kattoliitto ry), Jorma Sikstus (Sto Finexter Oy), Teemu Allonen (Alimex Oy), Timo Rautanen (Saint-Gobain Rakennustuotteet / Weber), Mikko Nikander (Icopal Oy), Tomi Keinänen ja Mika Nevalainen (KKN-Rakennus Oy) sekä Sami Niemi, Hannu Pyy ja Jarmo Saarinen (Vahanen Oy / Vahanen Rakennusfysiikka Oy). He muodostivat laaja-alaisen ohjausryhmän, jonka kanssa keskusteltiin tutkimuslöydöksistä ja pohdittiin niiden merkitystä kuplimiseen. Kiitokset myös Heidän edustamilleen yrityksille ja yhdistyksille diplomityön rahoituksesta, joka mahdollisti tutkimuksen tekemisen.

Haluan kiittää jo edesmennyttä Aalto-yliopiston rakennusfysiikan professori Martti Viljasta ohjauksesta työn alkuvaiheessa sekä työn valvojana toiminutta siltatekniikan professori Risto Kiviluomaa kehitysehdotuksista ja palautteesta työn sisällöstä. Diplomityön ohjauksesta vastasi diplomi-insinööri Jarmo Saarinen Vahanen Rakennusfysiikka Oy:stä. Hän kannusti ja ohjasi minua niin kenttäkokeiden tekovaiheessa, tulosten analysoinnissa kuin työn kirjoittamisvaiheessakin.

Kiitos vaimolleni Hannalle, joka jaksoi kannustaa ja auttaa niin opinnoissa kuin työn valmiiksi saattamisessa sekä tyttärelleni Ainolle, joka vei ajatukset työpäivien jälkeen muihin asioihin. Kiitos myös vanhemmilleni, jotka tukivat opinnoissa sekä diplomityön teossa ja viimeistelyssä.

Erityiskiitos Kattava Oy:lle opiskeluja edeltäneistä kesätöistä, joissa tutustuin vedeneristystyöhön ja epoksitiivistykseen. Tämän ansiosta löysin minua kiinnostavan alan ja aiheen.

Toivon, että tästä diplomityöstä on myös pitkällä aikavälillä hyötyä siltojen pintarakenteiden kehittämisessä ja että minulla on mahdollisuus olla jatkossakin mukana tähän liittyvässä kehittämis- ja tutkimustyössä.

Helsinki 30.5.2016

Jarmo Julku

# Sisällysluettelo

Tiivistelmä

Abstract

Alkusanat

Sisällysluettelo

1	JOHDANTO .....	1
1.1	Tutkimuksen tausta .....	1
1.2	Tutkimuksen tavoite .....	2
1.3	Tutkimuksen rajaukset .....	2
2	SILLAN RAKENNE.....	3
2.1	Ulkomaisia pintarakenneratkaisuja.....	4
2.2	Siltakannen rakenne Suomessa.....	7
2.2.1	Pintarakenteet Suomessa.....	7
2.2.2	Betoninen siltakansi.....	8
2.2.3	Epoksitiivistys .....	9
2.2.4	Vedeneristys .....	11
2.2.5	Asfaltti .....	13
2.2.6	Vedenpoistojärjestelmät.....	13
3	PINTARAKENTEIDEN IRTOAMINEN VESIHÖYRYN VAIKUTUKSESTA. 16	
3.1	Vedeneristyksen irtoaminen alustasta.....	16
3.2	Epoksitiivistyksen epäjatkuvuuskohdat .....	19
3.2.1	Reikiintyminen .....	19
3.2.2	Halkeilu.....	20
3.2.3	Kannen betonin ominaisuudet .....	22
3.2.4	Betonikannen kosteustasapainon kehittyminen .....	23
4	KENTTÄKOKKEET .....	29
4.1	Tutkimuskohteet .....	30

4.2	Kenttäkokeiden tutkimusmenetelmät .....	38
4.2.1	Makrokarheus .....	38
4.2.2	Betonin tartuntavetolujuus .....	38
4.2.3	Kosteusmittaukset.....	39
4.2.4	Epoksitiivistyksen tartuntavetolujuus .....	40
4.2.5	Epoksitiivistyksen tiiveyden mittaus matala- ja korkeajännitemenetelmällä . .....	40
4.2.6	Ohuthietutkimus .....	41
4.3	Tulokset kenttäkokeista.....	42
4.3.1	Makrokarheus .....	42
4.3.2	Betonin tartuntavetolujuus .....	43
4.3.3	Kosteusmittaukset.....	44
4.3.4	Epoksitiivistyksen tartuntavetolujuus .....	47
4.3.5	Epoksitiivistyksen tiiveyden mittaus matala- ja korkeajännitemenetelmällä . .....	47
4.3.6	Ohuthieanalyysi.....	47
4.4	Tulosten tarkastelu .....	50
4.4.1	Makrokarheus .....	50
4.4.2	Tartuntavetolujuus .....	51
4.4.3	Kosteusmittaukset.....	55
4.4.4	Epoksitiivistyksen tiiveyden mittaus matala- ja korkeajännitemenetelmällä . .....	59
4.4.5	Ohuthieanalyysin tulosten tarkastelu .....	59
5	YHTEENVETO JA JOHTOPÄÄTÖKSET .....	62
	LÄHDELUETTELO.....	64
	LIITE 1: InfraRYL 2006 Osa 3:n mukaiset laadunvarmistustoimenpiteet silloissa	

## Määritelmät ja lyhenteet

Absoluuttinen kosteus	Betonin kosteuspitoisuus ilmoitettuna haihtumiskykyisen veden massan suhteena kuiva-aineen massaan prosentteina [m-%].
Epoksiitiivistys	Koostuu kahteen kertaan levitetystä tiivistysepoksikerroksesta, jonka ensimmäisen kerroksen päälle levitetään sirotehiekkä.
InfraRYL	Infrarakentamisen yleiset laatuvaatimukset
K-MS	Aluskermi (M), jonka valmistukseen on käytetty kumibitumia (K) ja tukikerroksena on polyesterihuopa (S).
K-PS	Pintakermi (P), jonka valmistukseen on käytetty kumibitumia (K) ja tukikerroksena on polyesterihuopa (S).
KVL	Vuoden keskimääräistä vuorokausiliikennemäärää kuvaava arvo.
P-luku	Betonin pakkasenkestävyyttä kuvaava pakkasenkestävyysluokka. Siltarakenteet jaotellaan pakkasenkestävyysluokkiin P20, P30, P50 ja P70. Betonin pakkasenkestävyys on sitä parempi mitä suurempi pakkasenkestävyysluku on.
SILKO	Liikenneviraston siltojen korjausohjeet. Ohjeet koostuvat yleisistä ja työkohtaisista laatuvaatimuksista sekä tarvike- ja työvälinetiedoista.
SL	Silloilla käytettävien vedeneristyskermien tuoteluokka.
Suhteellinen kosteus, RH	Ilmassa olevan vesihöyryn ja ilman lämpötilaa vastaavan kylmäisen vesihöyryn osapaineiden suhde prosenttilukuna [RH-%].

# 1 JOHDANTO

## 1.1 Tutkimuksen tausta

Sillat ovat tärkeä osa tieverkoston infrastruktuuria. Parantamalla siltojen pitkäaikaista kestävyyttä vähennetään siltojen korjaamiseen kuluja kustannuksia ja haittaa tien käyttäjille. Liikenneviraston ohjeiden mukaan betonisen sillan tavoitteellinen käyttöikä on 100 vuotta. Tähän käyttöikään päästäkseen silta tarvitsee säännöllistä kunnossapitoa sekä muutaman peruskorjauksen. Yleisimmät syyt siltojen korjaustarpeeseen ovat sillan betonisen kantavan kansilaatan yläpuolisten rakenteiden eli niin sanottujen pintarakenteiden vaurioituminen. Pintarakenteiden irtoaminen vesihöyryn vaikutuksesta (kupliminen) aiheuttaa usein asfaltin hajoamisen ja vedeneristeen vaurioitumisen. Kuplimistapauksissa pintarakenteet joudutaan korjaamaan turvallisuuden sekä sillan kestävyysvaaran vuoksi. Vedeneristeen vaurioituessa sillalla oleva vesi ja tiesuolan kloridit pääsevät imeytymään betonirakenteeseen ja nopeuttavat betonin karbonatisoitumista sekä terästen korroosiota. Teräsbetonisilloissa vedeneristeen vaurioituminen nopeuttaa sillan kantavien rakenteiden terästen korrodoitumista ja lyhentää sillan käyttöikää. Yleensä, kun kupliminen huomataan, on vauriot pintarakenteille jo tapahtunut ja joudutaan toteuttamaan nopeasti kalliita korjaustoimenpiteitä. [10, 32]

Pääsyy pintarakenteiden kuplimiselle on vesihöyryn aiheuttama paine vedeneristysten ja epoksitiivistysten alla. Pintarakenteiden alapuolisissa betonirakenteissa oleva kosteus pyrkii poistumaan rakenteesta tasaantuen ympäröivään kosteuteen. Kuumina kesäpäivinä lämpötilan noustessa vesihöyryn höyrynpaine kasvaa betonin huokosissa epoksitiivistysten alla. Kupliminen tapahtuu epoksitiivistyksessä olevan epäjatkuvuuskohdan läheisyydessä, jossa vesihöyryn aiheuttama paine pääsee purkautumaan epoksitiivistysten päälle. Kohdissa, joissa vedeneristeellä on huono tartunta, vedeneriste irtaantuu alustastaan vesihöyryn paineen vaikutuksesta. Elastiseen vedeneristeeseen muodostuu kupla, joka nostaa päällä olevan asfaltin koholle. Päältä ajavien ajoneuvojen mekaaninen rasitus rikkoo koholla olevan asfaltin ja asfaltin kappaleet rikkovat vedeneristeen ja epoksitiivistysten. Muita syitä pintarakenteiden kuplimiselle ovat rakennusvaiheessa epoksitiivistysten päälle tai vedeneristekerroksen muodostavien kahden kumibitumikermin väliin jäänyt kosteus, joka höyrystyy lämpötilan noustessa. [10, 17, 40]

Suomessa on käytetty yleisesti epoksitiivistystä estämään vesihöyryn siirtymisen betonirakenteesta vedeneristeen alle 1990-luvulta lähtien. Kuitenkin vuosina 2010 – 2011 on havaittu useita kuplimistapauksia Suomen silloilla [32]. Epoksitiivistysrakennusratkaisun toteutukselle on olemassa ohjeet ja vaatimukset. Tämän hetken käsityksen mukaan näitä ohjeita ja vaatimuksia noudattamalla pitäisi päästä sellaiseen lopputulokseen, missä kuplimista ei ilmene. Hyvään lopputulokseen pääsemiseksi Suomessa on järjestetty siltatyömailla toimiville urakoitsijoille ja valvojille vuodesta 2012 alkaen sertifiointikurssia sekä laadittu ohjeet sääsuojan käytöstä eristystöiden aikana. Tutkituissa kuplimistapauksissa on löydetty kohteita, joissa erilaiset epoksitiivistysten epäjatkuvuuskohdat ovat mahdollistaneet vesihöyryn siirtymisen vedeneristyskerroksen alle sekä kohteita, joissa vedeneristyskerroksen välissä on ollut kosteutta. Epoksitiivistykseen muodostuvien reikien ja halkeamien syntyä ei ole yhtenevästi mielipidetty. Mahdollisina syinä pidetään epoksin tai betonin ominaisuuksien muuttumista tai epoksin levitysolosuhteita.



## **1.2 Tutkimuksen tavoite**

Diplomityön tavoitteena on tutkia betonisen siltakannen epoksitiivistystä, pintarakenteita ja kuplanmuodostumista vedeneristyskermien alle. Tavoitteen saavuttamiseksi tehdään kirjallisuusselvitys ja kenttäkokeita uudissiltakohteissa.

Kirjallisuusselvityksen avulla tutkitaan Suomessa ja muissa maissa käytettyjä siltojen pintarakenneratkaisuja. Selvityksen kohteena on kuplanmuodostuminen vedeneristysten alle, betonin kosteustasapainon kehittyminen ja mahdolliset syyt epoksitiivistyksen epäjatkuvuuskohtien muodostumiseen. Kirjallisuusselvityksen lisäksi aiempia ratkaisuja ja nykyistä tilannetta kartoitetaan asiantuntijahaastatteluilla, jotka kohdistetaan Suomessa pitkäaikaisesti vaikuttaneisiin siltojen pintarakenneasiantuntijoihin sekä diplomityönohjausryhmään valittuihin henkilöihin. Haastatteluiden avulla pyritään saamaan lisätietoa tehdyistä tutkimuksista sekä käytännön kokemuksista.

Kenttäkokeet suoritetaan viidessä suomalaisessa uudissiltakohteessa. Liikenneviraston ohjeistuksen mukaan tehtyjen laadunvarmistusmittausten lisäksi kenttäkokeissa suoritetaan lisäkosteusmittauksia ja tutkitaan betonin laatua vetokokein ja ohuthieanalyysin. Kenttäkokeiden tarkoituksena on perehtyä laadunvarmistusmittauksiin ja tutkia betonin absoluuttisen kosteuden mittauksen luotettavuutta arvioitaessa betonin kosteuspitoisuutta ennen epoksitiivistyksen levitystä. Luotettavuutta tutkitaan vertailemalla absoluuttisen kosteuden ja suhteellisen kosteuden mittauksia eri syvyyksiltä sekä tutkimalla siltakannen kuivumista näiden mittausten menetelmien perusteella. Kenttäkokeissa ei käsitellä pitkäaikaista rakenteiden toimintaa, vaan mittaukset ja tutkimukset keskittyvät rakennusvaiheeseen. Koeosuudessa tutkittavat kohdat edustavat vain paikallisia osia siltakannesta, joka vaikeuttaa tarkempien johtopäätösten tekoa.

## **1.3 Tutkimuksen rajaukset**

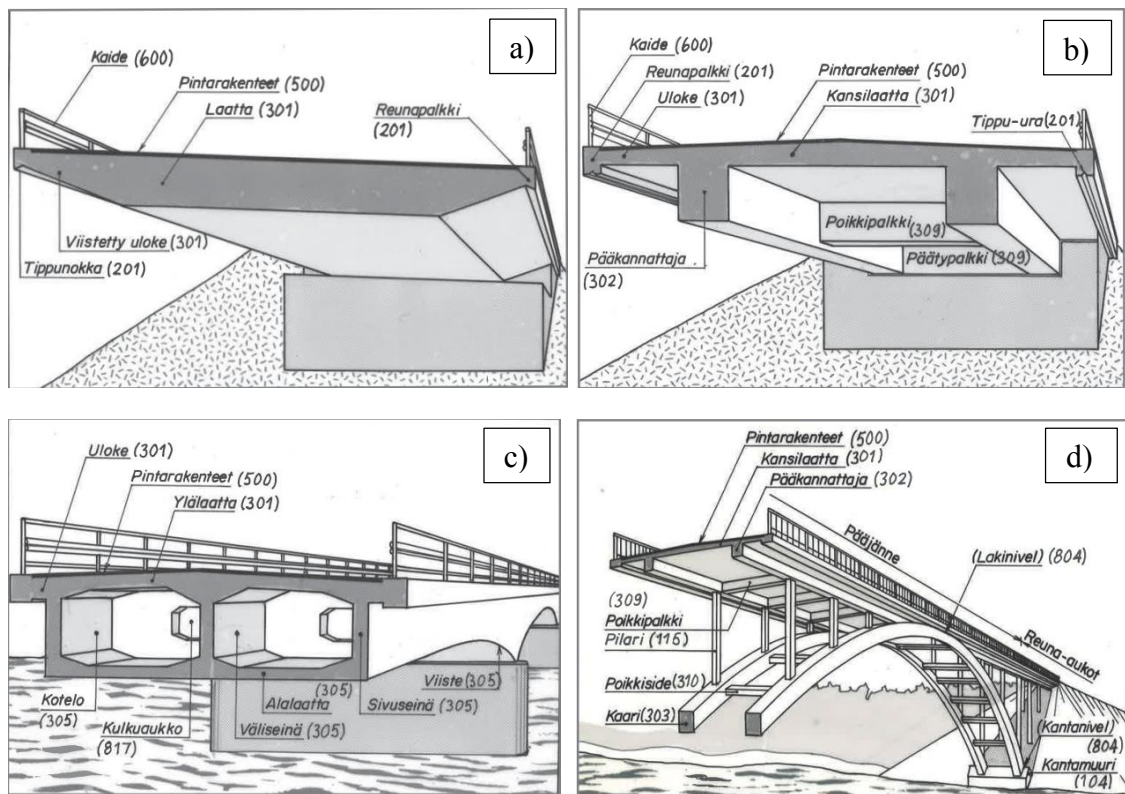
Tutkimuksen kenttäkokeet on rajattu suomalaisten betonisten siltakansien tutkimukseen. Työssä käsitellään betonisia siltakansia, jotka vaativat Liikenneviraston ohjeistuksen mukaan epoksitiivistyksen ennen vedeneristystä. Vedeneristysmateriaaliksi on tutkittavissa kohteissa suunniteltu kumibitumikermieristys. Mittaukset eivät käsittele välittömästi reunapalkin vieressä olevia alueita, vaan mittaukset suoritetaan vähintään 500 mm päässä reunapalkista, kuten laadunvarmistusmittaukset. Tutkimuksessa ei esimerkiksi käsitellä sillan kuormituskestävyyttä, siltakanteen kohdistuvaa mekaanista rasitusta tai betonikannen halkeamien muodostumisen syitä.

Kirjallisuusselvityksessä käsitellään pintarakenteita Suomessa ja muissa maissa betonisilla siltakansilla. Kirjallisuusselvitys käsittelee sillan pintarakenteita pitkällä aikajänteellä, kun taas kenttäkokeet ja mittaustutkimukset käsittelevät vain rakennusaikaista tilannetta.

## 2 SILLAN RAKENNE

Silta koostuu alus- ja päällysrakenteista. Alusrakenteita ovat muun muassa paalut, maa- ja välituet, holvi- ja kaarisiltojen kantamuurit, köysirakenteiden pylonit ja kehäsiltojen peruslaatat. Päällysrakenteisiin kuuluvat muun muassa kannatinrakenteet, joiden päätyyppejä ovat laatta, palkki, kehä, kaari, holvi ristikko ja erilaiset köysirakenteet, kansirakenne pintarakenteineen sekä varusteet ja laitteet. Päällysrakenteet siirtävät silta-aukkoon kohdistuvat kuormat alusrakenteille ja alusrakenteet siirtävät päällysrakenteilta tulevat kuormat maaperään.

Betonirakenteiset sillat voidaan jakaa seuraaviin siltatyyppeihin: kehäsillat, laattasillat, laattapalkkisillat, kotelopalkkisillat, kaarisillat ja vinoköysisillat. Osassa teräsrakenteisia siltoja on myös teräsbetoninen kansilaatta, jonka rakenne on samankaltainen kuin betonisiltojen kansilaatta. Kuvissa 1a – 1d on esitelty erilaisia siltatyyppejä ja niiden rakennegoisia. [21]



Kuva 1. Suomessa käytettyjä tavanomaisia teräsbetonisiltojen tyyppiratkaisuja. a) laattasilta, b) palkkisilta, c) kotelopalkkisilta ja d) kaarisilta. [21]

Eri siltatyyppeiden suurimmat erot ovat kantavissa rakenteissa, mitkä vaikuttavat myös siltakannen muotoon ja massiivisuuteen.

Sillan pintarakenteilla tarkoitetaan sillan kantavan laatan päällä olevia rakennegoisia. Tyyppillisesti pintarakenteet koostuvat vedeneristyksestä, asfalttikerroksista ja vedenpoistojärjestelmästä.

## **2.1 Ulkomaisia pintarakenneratkaisuja**

### **Tanska**

Tyypillinen tanskalainen pintarakenne ylhäältä alaspäin koostuu 35 - 40 mm paksusta kulutuskerroksesta, joka on kivimastiksiasifalttia tai asfalttibetonia. 40 - 45 mm paksusta asfalttibetoni sidekerroksesta. Sidekerroksen alla on kuivatus- tai suojakerros, joka on asfalttibetonia, jonka tyhjätila on 18 – 24 %. Vedeneristeenä on kaksinkertainen kumibitumikermieristys, jonka alustana on epoksitiivistys. Pintarakenne on hyvin lähellä vastaavaa suomalaista pintarakennetta. [32]

### **Norja**

Norjassa pintarakenne koostuu tyypillisesti yli 40 mm paksusta valuasfaltti- tai asfalttibetonikerroksesta, tarvittaessa sidekerroksesta, joka on asfalttibetonia tai asfalttisorabetonia, 12 mm mastiksivedeneristyskerroksesta, sirotehiekasta ja kumibitumisivelystä. Norjassa ei ole käytössä epoksitiivistystä. [32, 53]

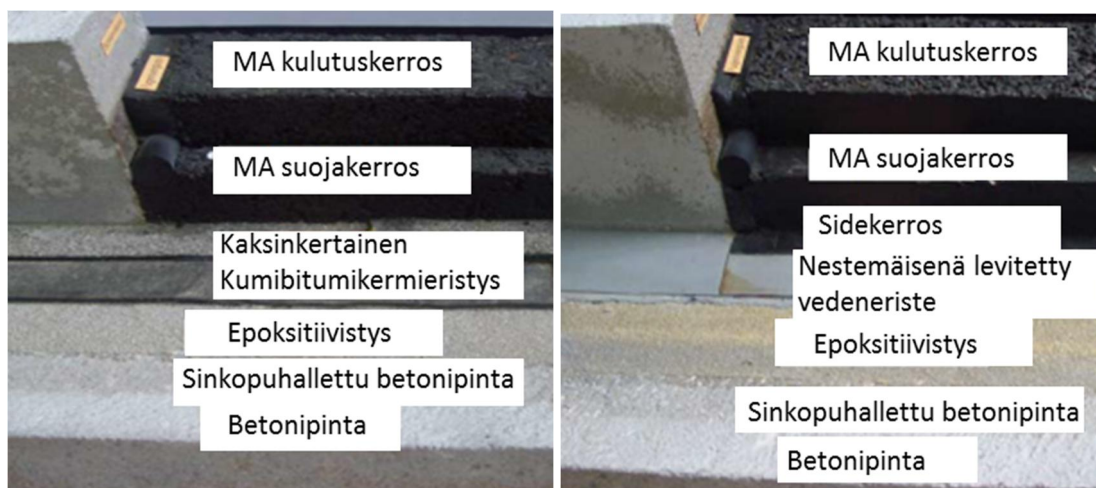
### **Ruotsi**

Ruotsissa tyypillisen pintarakenteen yläpinnassa on ensin 40 mm paksu asfalttibetonikerros. Kulutuskerroksen alapuolella on 50 mm paksu polymeerimodifioitu kivimastiksiasifalttikerros, joka on side- ja suojakerroksena, mutta toimii myös osittain vedeneristyskerroksena tiiveytensä takia. Varsinaisena vedeneristeenä on kumibitumikermieristys, jonka tartunta-aineena on kumibitumisively tai metyyliimetakrylaattiesikäsittely. Ruotsissa ei ole käytössä betonipinnan epoksitiivistystä vaan yleensä käytetään suojabetoni-laattaa vedeneristeen päällä [32, 53]

### **Saksa**

Saksassa pintarakenne koostuu tyypillisesti kahdesta asfalttikerroksesta, joiden alla on vedeneristys ja epoksitiivistys. Yleensä suoja- ja kulutuskerros on mastiksiasifalttia, mutta kulutuskerros voi olla myös muuta asfalttilaattaa. Asfalttikerrosten paksuus on vähintään 35 mm ja enintään 40 mm. Kerrosten paksuus riippuu runkoaineen maksimiraekoosta. Kulutuskerros ei yleensä toimi osana eristystä, vaan on huokoisempaa materiaalia ja läpäisee vettä. Vedeneristyskerroksena Saksassa käytetään tyypillisesti joko kumibitumikermiä tai nestemäisenä levitettävää vedeneristettä. Kummankin vedeneristeen alla betonin pinnassa käytetään samankaltaista epoksitiivistystä kuin Suomessa. Esimerkki Saksassa käytössä olevista pintarakenneratkaisuista on esitetty kuvassa 2. [8]

Myös Saksassa siltojen pintarakenteissa käytettäville materiaaleille vaaditaan hyväksyntä kansalliselta tietutkimuslaitokselta [53]



Kuva 2. Kuvissa on esitetty esimerkit Saksassa käytössä olevista pintarakennekerroksista. [8]

## Ranska

Ranskassa käytetään tyypillisesti neljää erilaista pintarakenneratkaisua. Yleisimmät näistä neljästä ratkaisusta ovat mastiksiasifaltti- ja bitumikermirakenne. [8]

Mastiksiasifaltti voidaan toteuttaa joko yksi- tai kaksikerroksisena. Yksikerrosrakenteessa kulutuskerroksen paksuus on 70 mm ja sen alla on 15 – 18 mm paksu mastiksiasifalttikerros. Mastiksiasifaltin alla on polyuretaanihartsikerros. Kaksikerrosrakenteessa kulutuskerroksen paksuus on 30 – 50 mm ja sen alla on kahdessa osassa levitetty 20 – 22 mm ja 8 mm paksuiset mastiksiasifalttikerrokset. Kaksikerrosratkaisun asfalttikerrosten alla on pinnoite betonipinnassa. [8]

Myös bitumikermeillä eristettäessä käytössä olevia rakenneratkaisuja on kaksi. Ensimmäisessä rakenteessa on päällimmäisenä vähintään 70 mm paksu asfalttikerros, jonka alla on 25 – 45 mm vahvuinen bitumikermikerros. Bitumikermien alla on tartunta-aine (bitumiliuos), joka on levitetty betonipinnalle. Toisessa rakenteessa päällimmäisenä on 50 – 70 mm paksu kulutuskerros, joka on mastiksiasifalttia ja 25 mm paksu suojakerros mastiksiasifaltista. Asfalttien alla on 27 – 35 mm vahvuinen bitumikermikerros, jonka alla on tartunta-aine, joka on levitetty betonipinnalle. [8]

## Turkki

Turkissa tyypillinen siltakannen pintarakenne yläpinnasta alaspäin koostuu 40 mm paksusta asfalttibetonikerroksesta tai 50 mm paksusta kivimastiksiasifalttikerroksesta, kumi-bitumikermeistä ja bitumipohjaisesta tartunta-aineesta. [8]

## Alankomaat

Alankomaiden infrastruktuurin ja ympäristön ministeriö on julkaissut ohjeen asfalttipäällysteisten betoni- ja teräsiltojen suunnittelusta vuonna 2012. Ohjeessa esitellään vakio-toteutustavat siltakansien pintarakenteille, mutta myös muut pintarakenneratkaisut ovat mahdollisia, jos ne täyttävät pintarakenteille asetetut vaatimukset. [8]

Tyypillinen huokoinen kulutuskerrosratkaisu betoniselle siltakannelle koostuu kulutuskerroksesta, joka on 30 – 40 mm huokoista asfalttia, 50 mm huokoista asfalttia tai yhteensä 70 mm huokoista asfalttia kahdessa kerroksessa. Kulutuskerroksen alla on tartunta-aine, joka parantaa kulutus- ja suojakerroksen tartuntaa toisiinsa. Suojakerros koostuu 50 -70 mm paksusta asfalttibetonikerroksesta, jolle on asetettu vesitiiveysvaatimus. Betonipinnan yli 20 mm syvät epätasaisuudet tasoitetaan asfalttibetonilla ja käsitellään tartunta-aineella ennen suojakerroksen asennusta. Betonin pinta käsitellään tartunta-aineella, ennen asfaltin asennusta. Tartunta-ainetta levitetään 0,6 kg/m<sup>2</sup> kahdessa osassa ja pintaan tulee tartuntaa parantava sirote. Uudet sillat, joissa on tuore betonipinta, käsitellään kosteussululla ennen tartunta-aineen levitystä. [8] Tartunta-aine ja kosteussulku ratkaisut ovat todennäköisesti vastaavia kuin epoksitiivistys.

Tiiviin kulutuskerroksen pintarakenne betoniselle siltakannelle koostuu 50 – 70 mm asfalttibetonikerroksesta, jolle on asetettu vesitiiveysvaatimus. Tiiviin kulutuskerroksen rakenteessa ei ole suojakerrosta, mutta muuten rakenne vastaa huokoisen kulutuskerroksen pintarakennetta. [8]

### **Tšekki**

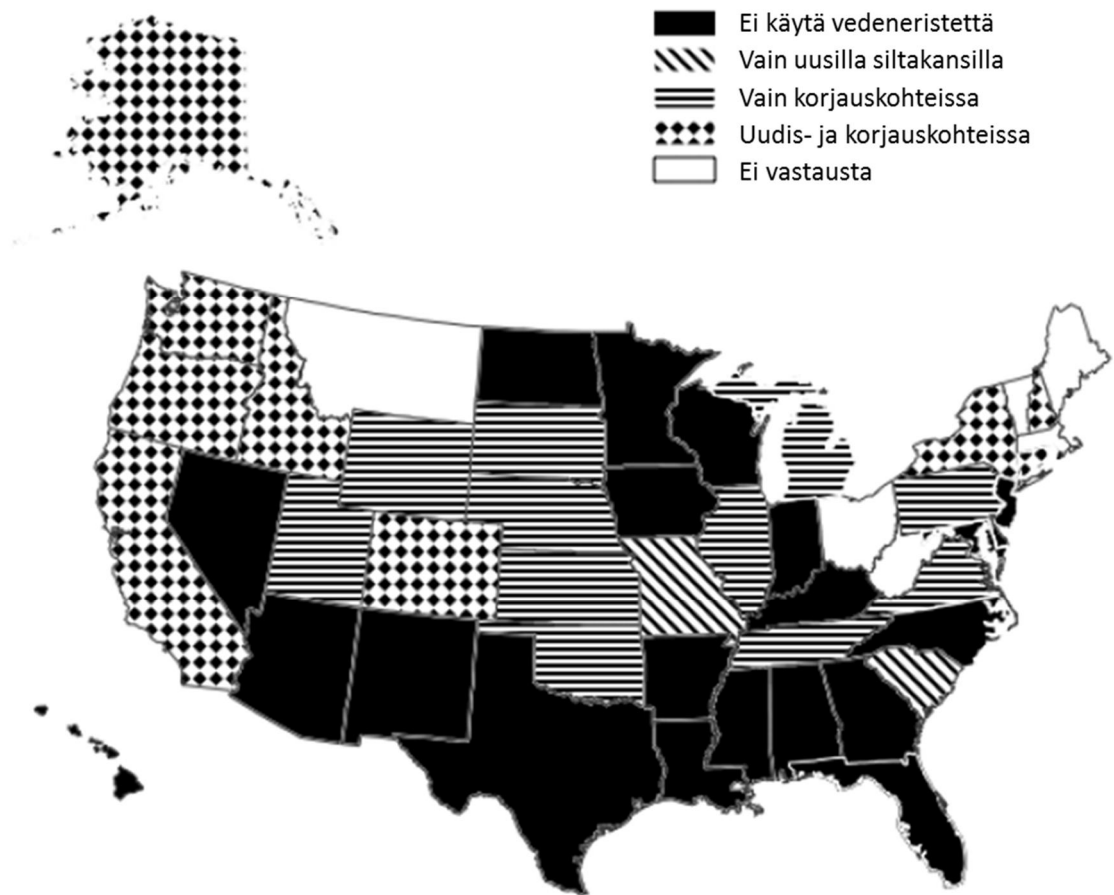
Tšekkiläinen tiehallinto suosii mastiksiasifalttia suojakerroksena ja vedeneristeenä bitumikermejä tai ruiskutettavia vedeneristeitä. Ruiskutettavat vedeneristeet voivat olla esimerkiksi polyuretaanipohjaisia. Myös muut pintarakenneratkaisut ovat mahdollisia, kunhan käytettävät materiaalit ovat tiehallinnon hyväksymiä. [8]

### **Unkari**

Unkarissa betonisissa siltakansissa käytetään pintarakenteina kaksin- tai kolminkertaista asfalttia liikennekuorman mukaan. Asfaltti koostuu kevyemmin rasitetuilla siltakansilla yhteensä 80 mm paksusta kulutus- sekä suojakerroksesta ja raskaammin rasitetuilla siltakansilla yhteensä 120 mm paksusta kulutus-, side- ja suojakerroksesta. Käytetty asfaltti on tavallisesti mastiksiasifalttia, jonka sideaineena on puhallettu tai modifioitu bitumi. Vedeneristeenä siltakansilla käytetään puhalletusta tai modifioidusta bitumista valmistettuja kermejä, sementtipohjaisia vedeneristystuotteita, mastiksia tai muovipohjaisia ruiskutettavia vedeneristeitä. Käytettävään pintarakenneratkaisuun vaikuttavat sillan ominaisuudet, kuten sillan rakenne ja jänneväli, suunniteltu käyttöikä sekä rakennusolosuhteet. [8]

### **Yhdysvallat**

Yhdysvalloissa 2011 tehdyn kyselyn mukaan osa osavaltioista käyttää vedeneristeitä ja osa ei (kuva 3). Kermejä ja nestemäisiä vedeneristeitä käytetään suunnilleen yhtä paljon. Kermit voivat olla valmistettu bitumista, modifioidusta bitumista, polymeereistä tai bitumista ja polymeereistä. Kermit voivat olla itseliimautuvia tai kuumentamalla betoniin hitsattavia. Molemmissa tapauksissa betoni käsitellään tartunta-aineella. Nestemäisenä levitettävät vedeneristeet levitetään kuumana tai kylmänä ruiskuttamalla, telaamalla tai sivelemällä. Nestemäisenä levitettävään vedeneristeeseen voidaan myös asentaa vahvikekan gas. Materiaaleina nestemäisenä levitettäville vedeneristeille ovat muun muassa kaksikomponenttiset polymeerit, polyuretaani ja metyyliimetakryyli, kumipolymeerit ja polymeerimodifioitu bitumi. Joissain osavaltioissa käytetään myös epoksitiivistystä betonikannen pinnassa. [41]

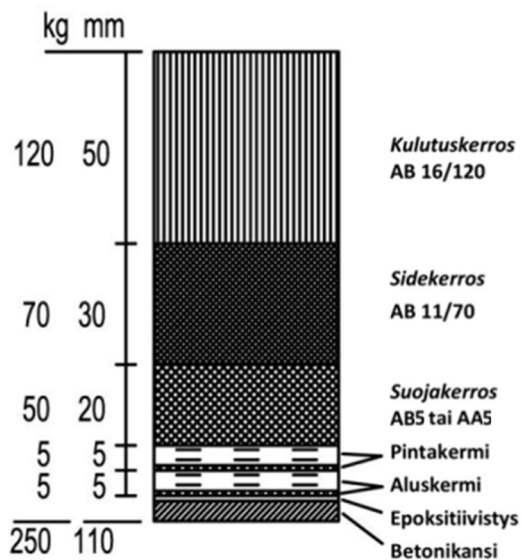


Kuva 3. Yhdysvalloissa vedeneristeen käyttö siltakansilla osavaltioittain. [41]

## 2.2 Siltakannen rakenne Suomessa

### 2.2.1 Pintarakenteet Suomessa

Tyypillisimmän pintarakenteen kerrokset Suomessa on esitetty kuvassa 4.



Kuva 4. Esimerkki Suomessa käytettävistä pintarakennekerroksista. [22]

Pintarakenneratkaisut ovat hyvin samankaltaisia Suomessa ja muissa tutkituissa maissa. Vedeneristysratkaisuissa on pieniä eroja, mutta tartunta-aineen käytössä kaksinkertaisen kumibitumikermieristyksen alla on maakohtaisia suuriakin eroja. Toinen selkeä ero maiden pintarakenneratkaisuissa liittyy asfalttikerrosten paksuuteen ja laatuun.

Pintarakenteista varsinkin vedeneristyksen asennus ja siihen liittyvät työt ovat hyvin virheherkkä työvaihe. Tämän vuoksi Suomessa on määrätty tarkat raja-arvot vedeneristyksen ja epoksitiivistyksen asennuksen sääolosuhteille. Lisäksi ennen epoksitiivistyksen asennusta pitää varmistua laadunvarmistusmittauksilla siltakannen betonipinnan sopivista ominaisuuksista. [24] Vastaavia mittauksia on käytössä ainakin Saksassa ja joissakin muissa Euroopan maissa [53]. Laadunvarmistusmittaukset on esitetty tarkemmin kappaleessa 4 Kenttäkokeet.

Suomessa käytettävien vedeneristysrakenteiden ja –tuotteiden on täytettävä Liikenneviraston ohjeen 9/2015 Siltojen vedeneristysten SILKO-vaatimukset ohjeessa esitetyt vaatimukset. [23]

Tyypilliset Suomessa käytössä olevat pintarakennekerrokset on esitetty seuraavissa kappaleissa. Siltakansi ei ole osa pintarakenteita, mutta sitä on käsitelty seuraavassa kappaleessa, koska se toimii pintarakenteiden pohjana.

## 2.2.2 Betoninen siltakansi

Siltabetonin pitää täyttää yleiset laatuvaatimukset, jotka vaihtelevat maasta ja organisaatiosta riippuen. Betonisten siltakansilaattojen rakenne vaihtelee paljon. Rakenteen paksuudelle ei ole määritelty minimipaksuuksia, vaan siltakannen täytyy täyttää sille asetetut vaatimukset, joihin vaikuttavat muun muassa suunnitellut jännevälit ja kuormitus. Siltakannen paksuuteen vaikuttavat myös kantavien pilareiden, palkkien ja aukkojen mitat.

Sillan betonin osa-aineiden tulee täyttää Suomen rakentamismääräyskokoelmassa ja standardissa SFS-EN 206-1 ja sen kansallisissa liitteissä osa-aineille asetetut vaatimukset, ellei InfraRYL 2006, osa 3:ssa ole muuta mainittu. Meriveden käyttö siltabetonin valmistuksessa on kielletty meriveden sisältämien kloridien takia. Betonimassan ja kovettuneen betonin tulee täyttää sille rakennesuunnitelmissa asetetut vaatimukset. Kovettuneen betonin tulee muun muassa täyttää sille asetetut lujuus-, säilyvyys- ja pakkasenkesto-vaatimukset. Valmiin siltakannen betonipinnan karkeuden tulee vastata puuhierrettyä betonia. [38]

Siltakannen betonipinnan tulee olla tarpeeksi tasainen yhtenäisen ja tiiviin epoksitiivistyksen saavuttamiseksi. Betonipinnan tasaisuus mitataan 1,5 metriä pitkällä oikolaudalla. Mittaus suoritetaan standardin SFS-EN 13036-7 mukaan. Pinnan epätasaisuuksia voidaan poistaa hiomalla, jyrsimällä tai tiivistysepoxin ja kvartsihiekan seoksella. Epoksitiivistyksen ensimmäisen kerroksen pintaan sirotellaan kvartsihiekkaa vedeneristyksen tartunnan parantamiseksi ja rikkomaan mahdollisia kuplia. Kvartsihiekkaa kasvattaa myös epoksitiivistyksen paksuutta. Eristettävästä betonipinnasta tulee poistaa tartuntaa heikentävät aineet kuten sementtiliima, jälkihoitoaine, liuottimet, öljy, rasva ja muut epäpuhtaudet. Epäpuhtauksien poistamiseen käytetään sinko- tai hiekkapuhallusta. Sinkopuhalluksella ei pystytä puhdistamaan reunapalkkien sisälaitoja, joten ne pitää puhdistaa erikseen hiomalla esimerkiksi timanttilaikalla. Pinta puhdistetaan ennen tiivistyksen aloittamista imu-

roimalla tai paineilmalla puhaltamalla. Puhdistetun pinnan puhdistusaste tulee olla normaalisti suihkupuhdistettu betonipinta. Tällöin sementtiliimaa on irronnut niin paljon, että betonipinnasta vähintään 25 % muodostuu kiviainesrakeiden pinnasta. [38]

Siltakannen betonipinnan tulee olla karheudeltaan sopiva, että hyvä epoksitiivistyksen ja vedeneristyksen tartunta saavutetaan. Puhdistetun betonipinnan makrokarheuden ennen epoksitiivistystä tulee olla välillä 0,3 – 1,2 mm. Karheus tarkastetaan lasihelmikokeella standardin SFS-EN 13036-1 mukaan. Lasihelmikokeita tehdään kolmesta kohdasta siltakannta jokaista alkavaa 500 m<sup>2</sup> kohden. Jos pinta on liian karhea, tulee se tasoittaa hiekkapöksillä, kun taas liian sileä pinta voidaan karhentaa sinko- tai hiekkapuhalluksella. Puhdistettu ja tasoitettu betonipinta katselmoidaan tilaajan, pääurakoitsijan ja eristysurakoitsijan edustajien toimesta vastaanottotarkastuksessa. [38]

### 2.2.3 Epoksitiivistys

Ennen vedeneristyksen asennusta puhdistettuun betonipintaan asennetaan yleensä epoksitiivistys, joka koostuu kahdesta levityskerrasta ja kvartsihiekkasiroteesta. Suomessa epoksitiivistys levitetään kauttaaltaan jännitetyille silloille sekä teräsbetonisilloille, joiden siltakannen paksuus on  $\geq 400$  mm, kun jokin seuraavista ehdoista on voimassa [38]:

- kyseessä on pääteiden ja niiden ramppien (so. valtatie, moottoriliikennetiet, moottoritiet) sillat tai
- sillan liikennemäärä (KVL) on vähintään 3000 ajoneuvoa/vrk tai
- siltakannelle levitetään liukkaudentorjuntasuolaa tai
- silta on suolattavan tien ramppisilta tai
- silta sijaitsee liikennevalojen läheisyydessä tai
- sillan pituuskaltevuus on vähintään 4 %.

Epoksitiivistys on hyvä tehdä myös silloille, joilla edellä mainitut ehdot eivät täyty, koska epoksitiivistyksen uskotaan vähentävän pintarakenteiden kuplimisriskiä [32]. Epoksitiivistyksen tehtävänä on estää vesihöyryn siirtyminen betonista vedeneristeen alle ja näin estää vedeneristeen irtoaminen alustasta vesihöyryn vaikutuksesta. Yhtenäinen epoksitiivistys estää myös kloridien kulkeutumisen betonirakenteeseen.

Ennen epoksitiivistystä siltakannen yläpinnassa olevat halkeamat tulee imeyttää tai injektoida tarkoitukseen soveltuvalla SILKO-hyväksytyllä epoksilla. Epoksitiivistys tehdään kahtena kerroksena epoksin valmistajan ohjeiden mukaan. Ensimmäisen kerroksen epoksimenekki tulee olla 300-500 g/m<sup>2</sup> pinnan huokoisuudesta ja karheudesta riippuen (kuva 5). Pinnan karheuden varmistamiseksi ensimmäisen epoksikerroksen päälle levitetään sirotehiekkä, kun pinta ei ole vielä kovettunut (kuva 6). Toisen epoksitiivistyskerroksen epoksimenekki tulee olla vähintään 600 g/m<sup>2</sup> (kuva 7). Valmiin epoksitiivistyksen tulee olla yhtenäinen eikä siinä saa olla reikiä tai muita epäjatkuvuuskohtia. Epoksitiivistys on oikein tehtynä vesihöyrytiivis. Tiivistyksen yhtenäisyyttä ja tiiveyttä mitataan joko matala- tai korkeajännitemenetelmällä. Mahdolliset vuotokohdat paikataan lisäämällä epoksia tai hiekkapöksia. Valmiin epoksitiivistyksen päällä ei saa kulkea turhaan ja pinta on suojattava mahdollisilta iskuilta ja kulutukselta. Tiivis epoksitiivistys tulee vedeneristää yhden viikon kuluessa tiivistyksen valmistumisesta. [38]





*Kuva 5. Epoksitiivistyksen ensimmäistä kerrosta levitetään lastalla kuvan oikeassa laidassa. Levityksen jälkeen epoksi telataan. (kuva: Jommi Kuronen)*



*Kuva 6. Epoksitiivistyksen ensimmäisen levityskerroksen päälle levitetään sirotehiekkä, joka rikkoo mahdollisia ilmakuplia, paksuntaa tiivistystä ja luo tartuntapinnan kumibitu-mikermieristykselle. (kuva: Jommi Kuronen)*



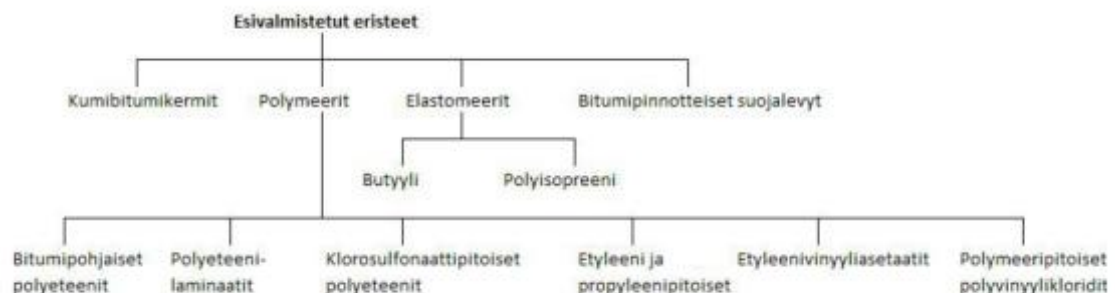
Kuva 7. Epoksitiivistyksen toisen kerroksen levitys ja telaus. Ennen toisen kerroksen levitystä ylimääräinen sirotehiekkä on puhallettu pois. (kuva: Jommi Kuronen)

Epoksitiivistystyön aikana ilman ja betonikannen lämpötilaa ja olosuhteita on seurattava. Epoksoitavan betonipinnan lämpötila ei saa laskea alle 10 °C eikä kolme astetta alle ilman kastepistelämpötilan. Ilman suhteellinen kosteus ei saa nousta yli 85 RH-%. [39]

Suomessa käytettävät tiivistysepoksit ovat 2-komponenttisia, liuotteettomia, kuumuutta kestäviä ja hyvän tunkeutuvuuden omaavia. Kuten kaikkien silloilla käytettävien materiaalien, myös tiivistysepoksien pitää täyttää sille asetetut SILKO-vaatimukset. [3, 44]

## 2.2.4 Vedeneristys

Siltakansilla käytettävät vedeneristeet voidaan jakaa esivalmistettuihin ja nestemäisenä levitettäviin vedeneristeisiin. Nämä vedeneristeet on luokiteltu kuvissa 8 ja 9. Suomessa käytössä on lähinnä kumibitumikermieristeet, mastiksieristys ja nestemäisenä levitettävät eristeet. [32]



Kuva 8. Siltakansilla käytettävät esivalmistetut vedeneristeet jaotellaan valmistus materiaaliensaperusteella kuvan mukaiseen taulukkoon. [28]





Kuva 9. Siltakansilla käytettävät nestemäisenä levitettävät vedeneristeet jaotellaan valmistusmateriaaliensa perusteella kuvan mukaisesti. [28]

Tässä työssä käsitellään vedeneristeistä vain epoksitiivistyksen päälle tehtyä kumibitumikermieristystä. Siltakansilla käytettävien kumibitumikermien tulee olla SILKO-hyväksyttyjä ja täyttää SILKO-hyväksyntä tutkimusohjeen liitteessä 5 niille asetetut vaatimukset. Kermien tyyppimerkinnot ovat aluskermille K-MS ja pintakermille K-PS. Kansilla käytettävät kermi kuuluvat tuoteluokkaan SL. [38] Suomessa kumibitumikermi ovat tulleet vedeneristyskäyttöön silloilla 1980-luvulla. [15]

Kumibitumikermi valmistetaan yleensä tislatus bitumista, johon on lisätty polymeerejä eli ne on valmistettu polymeerimodifioidusta bitumista. Tislatus bitumin perusraaka-aine on raakaöljy, joka sisältää hiiltä, vetyä, rikkiä, typpeä ja happea. Polymeerimodifioimalla parannetaan bitumin ominaisuuksia. Bitumituotteen lujuus, venymä, joustavuus, palautuvuus, kylmäkestävyys tai korkeiden lämpötilojen kestävyys, väsytykestävyys, tarttuvuus, vanhenemiskestävyys sekä säänkestävyys paranevat, kun käytetään polymeerimodifioitua bitumia. [6]

SILKO-hyväksytyt bitumituotteet sisältävät pääasiassa styreenibutadieniblokkipolymeeriä (synteettinen termoplastinen kumi) eli tuotteet ovat SBS-kumibitumia. Kumibitumi lyhennetään kirjaimilla KB ja perässä on luku, joka on bitumin pehmenemispiste. Kermien tukikerros on valmistettu lasikuituhuovasta, joka on kyllästetty SBS-kumibitumilla. Lisäksi kermissä on alapinnassa hitsausbitumikerros tai liimattavissa kermeissä hiekkasirotepinta. Pohjakermeissä on yläpinnassa hiekkasirotekerros ja pintakermissä kermiä suojaava sirotekerros. [6]

Yleisin Suomessa käytettävä kermieristys siltakansilla on kaksinkertainen kumibitumikermieristys. Se koostuu yleensä liimattavasta aluskermikerroksesta ja aluskermiin hitsattavasta pintakermikerroksesta. Kermin liimaamisella tarkoitetaan kermin kiinnittämistä alustaan kannusta kaadettavalla sulalla kumibitumilla. Liimauksessa käytettävää kumibitumin määrää voidaan säädellä tarpeen mukaan. Aluskermi voidaan myös hitsata alustaan. Tässä tapauksessa kiinnitykseen käytettävä bitumi on valmiina kermin alapinnassa ja se sulatetaan kaasuliekillä kermin asennuksen yhteydessä. Sillan vedeneristyskurssilta saadun palautteen perusteella hitsatus kermin tartunta ei yleensä ole yhtä hyvä kuin liimattavissa kermeissä, mikä johtuu vähäisemmästä kiinnitysbitumin määrästä. Vähäisempi kiinnitysbitumin määrä hitsattavissa kermeissä ei täytä mahdollisia betonialustan epätasaisuuksia yhtä hyvin kuin liimausmenetelmässä käytettävä kannusta kaadettu

kumibitumi. Kermit asennetaan sillalle sillan pituussuunnassa niin, että ensimmäinen kermikaista asennetaan siltakannen alimpaan kohtaan. Näin vältetään veden virtaussuunnan vastaisilta saumoilta. Kermien limitys pituussuunnassa tulee olla vähintään 150 mm ja poikittaissuunnassa vähintään 100 mm. [32]

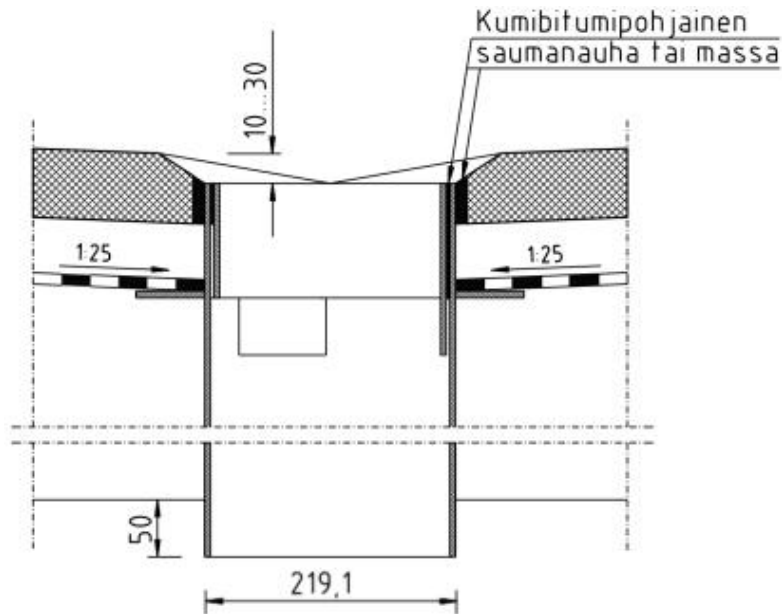
### 2.2.5 Asfaltti

Asfalttipäällystekerroksia on pintarakenteissa yleensä kolme: kulutuskerros, sidekerros ja suojakerros. Sidekerrosta ei aina käytetä pintarakenteissa. Kulutuskerroksen tulee kestää muun muassa nastarenkaiden kulutusta ja siirtää pyöräkuormia alempiin rakenteisiin. Kulutuskerros valmistetaan yleensä valuasfaltista, kumibitumivaluasfaltista tai kivimastik-siasfaltista. Kulutuskerroksen tulee olla suurirakeisesta kiviaineksesta valmistettu ja tiiviiksi tiivistetty, jotta kerros kestää siihen kohdistuvat rasitukset. Kulutuskerroksen ja sidekerroksen yhdistämisellä saavutetaan yleensä stabiili rakenne, joka kestää hyvin kuormia. Sidekerroksen tehtävänä on lisätä pintarakenteiden stabiiliutta. Suojakerros on valmistettu asfalttibetoni- tai avoinasfalttikerroksista. Huokoinen suojakerros mahdollistaa veden liikkumisen rakennekerroksessa. Suojakerroksen tehtävänä on myös nimensä mukaisesti suojata vedeneristystä likaantumiselta ja mekaaniselta rasitukselta työn aikana. [22, 36]

### 2.2.6 Vedenpoistojärjestelmät

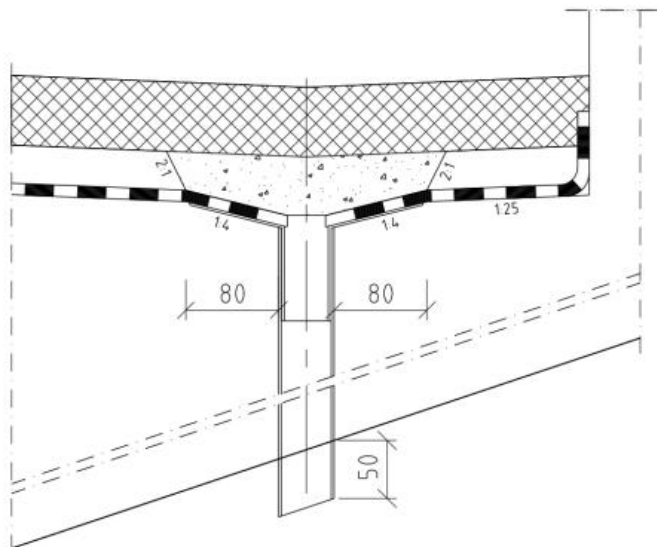
Sillan vedenpoistojärjestelmä on jaettu kahteen osaan. Päällysteen pinnalla oleva vesi pyritään johtamaan pois siltakannelta hulevesiputkien kautta. Asfalttipäällysteeseen tai päällysteen alle vedeneristeen päälle päässyt vesi johdetaan tippuputkien kautta pois rakenteesta. Siltarakenteessa ei ole kaivoja, vaan vedet johdetaan joko sillan alta kulkevan tien kuivatusjärjestelmään syöksytorvien avulla tai sillan alla oleviin kivipesiin. Hulevesikaivot sijoitetaan ennen siltaa ja siirtymälaattarakennetta korkeammalla olevan tiepenkereen puolelle, ettei tielle satava vesi kulkeudu sillalle. Näin sillalta tarvitsee poistaa vain sille satava vesi. Pintakerroksen ja betonipinnan kaltevuuteen tulee kiinnittää huomiota, koska veden poisto tapahtuu molemmista tasoista. Siltakannen pituuskaltevuus tulee olla vähintään 1 %. [18]

Sillan pinnalta vesi johdetaan hulevesiputkiin, jotka lävistävät siltakannen. Vesi kulkee hulevesiputkessa siltakannen läpi syöksytorviin tai muihin veden ohjauslaitteisiin niin, ettei hulevesiputkista tuleva vesi tipu alittaville väylille tai alusrakenteiden pinnoille. Hulevesiputkia asennetaan siltakannelle 10 – 15 metrin välein sillan poikkileikkauksen alimpiin kohtiin. Hulevesiputki on haponkestävästä teräksestä valmistettu yleensä 200 mm halkaisijalla oleva putki, joka asennetaan ennen valua siltakannen muottiin niin, että putken laippa jää valettavan siltakannen yläpinnan tasolle. Putkessa on kannattimet betonissa kiinni pysymistä varten. Putken pituus valitaan niin, että se jää 50 mm sillan alapinnan ulkopuolelle ja laipan yläpuolella olevan putken pituus valitaan pintarakenteiden paksuuden mukaan. Hulevesiputken ja asfaltin väli tiivistetään kumibitumipohjaisella saumanauhalla tai –massalla. Betonipinnan epoksitiivistys ja vedeneristys asennetaan hulevesiputken laipan päälle. Hulevesiputki varustetaan säleiköllä, joka on putken sisällä. Hulevesiputken poikkileikkaus on esitetty kuvassa 10. [19]



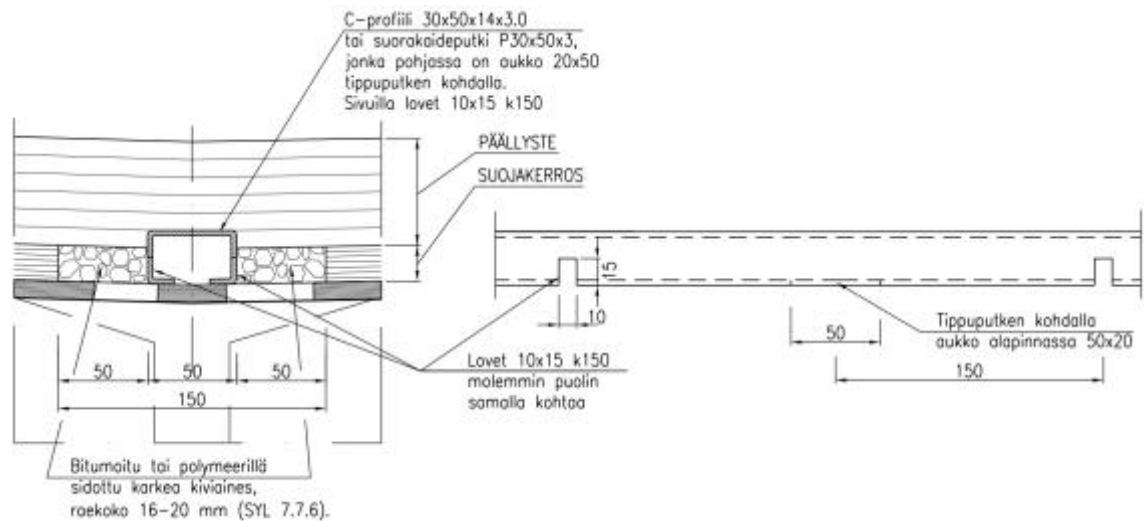
Kuva 10. Hulevesiputken poikkileikkaus. [19]

Asfalttikerrosten läpi vedeneristeen päälle kulkeutuva vesi poistetaan tippuputkien kautta. Tippuputket sijoitetaan riviin siltakannen poikkileikkauksen alimpaan kohtaan 3-6 metrin välein. Alueilla, joissa väylä alittaa sillan, asennetaan tippuputkien sijaan putkisalaoja, ettei vettä tipu alittavalle väylälle. Putkisalaojan päähän asennetaan tippuputki. Tippuputki koostuu ennen betonin valamista muottiin asennettavasta ulkoputkesta, joka jätetään noin 20 – 24 mm syvyyteen valun pinnasta. Betonin täryttämisen ja hiertämisen jälkeen putkeen upotetaan suppiloputki, jonka laipan reunat jäävät betonipinnan tasoon. Suppilon päälle asennetaan suojaverkko. Kymmenen millin jaolla oleva 0,9 mm vahvuisen teräsverkko estää kumibitumipohjaisen 16 – 20 mm runkoaineella valmistetun sidekerroksen korvaavaa massaa valumasta tippuputkeen. Epoksitiivistys ja vedeneriste asennetaan myös tippuputkien suppilon laipan päälle, ennen teräsverkon asennusta. Tippuputken halkaisija on noin 40 mm ja sen osat valmistetaan ruostumattomasta teräksestä. Tippuputken alapää ulottuu 50 mm siltakannen alapinnan ulkopuolelle. Tippuputken poikkileikkaus on esitetty kuvassa 11. [19]



Kuva 11. Tippuputken poikkileikkaus. [19]

Suomessa pintarakenteissa käytettävä salaoja on putkisalaoja. Putkisalaoja valmistetaan asentamalla C-profiili 30·50·14·3,0 aukko alaspäin tai suorakaideputki P30·50·3,0, jonka pohjassa on aukko 20mm · 50mm tippuputkien kohdalla tippuputkilinjalle. Putkien sivuilla on 10 mm · 15 mm lovet molemmissa kyljissä 150 millimetrin välein. Salaojan materiaali on ruostumatonta terästä. Putkisalaojan ympärille asennetaan bitumoitu tai polymeerillä sidottu karkeasta kiviaineksesta (16 – 20 mm) valmistettu suojakerros, joka johtaa vettä. Putkisalaojan poikkileikkaus on esitetty kuvassa 12. [19]



Kuva 12. Putkisalaojan poikkileikkaus. [19]

### 3 PINTARAKENTEIDEN IRTOAMINEN VESIHÖYRYN VAIKUTUKSESTA

#### 3.1 Vedeneristyksen irtoaminen alustasta

Pintarakenteet voivat irrota alustastaan vesihöyryn paineen vaikutuksesta. Tätä ilmiötä kutsutaan kuplimiseksi, koska vesihöyry muodostaa kuplan vedeneristekerroksena toimiviin kumibitumikermeihin. Kupliminen on ongelmana sekä uusissa että vanhoissa silloissa, mutta uusissa silloissa rakennekosteus on korkeampi kuin vanhoissa. Tiiviin epoksitiivistyksen ja vedeneristekerroksen alla rakennekosteus laskee hitaasti. Rakenteessa olevan kosteuden aiheuttaman vesihöyryn paineen vaikutuksesta vedeneristyskermit ja asfalttikerrokset irtoavat yleensä vain paikallisesti epoksitiivistyksestä. Betonin rakennekosteus ei koskaan laske siltarakenteissa niin alhaiseksi, ettei se kuumana kesänä aiheuttaisi lainkaan painetta vedeneristeen/epoksitiivistyksen alle. Kuplat syntyvät yleensä kohtiin, joissa epoksitiivistyksessä on epäjatkuvuuskohta ja kermin tartunta epoksitiivistykseen on muuta aluetta heikompi. Epoksitiivistyksen yläpuolella olevien pintarakenteiden paino, jäykkyys ja tartunta eivät riitä vastustamaan epoksitiivistyksen epäjatkuvuuskohtaan syntyvää painetta ja kupla pääsee muodostumaan kermin alle. Kaasun paine kuplassa on suhteellisen pieni verrattuna materiaalin painoon kermieristyksen päällä ja bitumin tartuntaan epoksitiivistykseen. Pyöräkuormat kuitenkin lisäävät painetta kuplassa, kun renkaat kulkevat kuplan päältä. [32] Tutkimusten mukaan lämpötilan nousu 5 C°:sta 50 C° voi luoda noin 0,03 MPa paineen kermin alle. Tämä paine on huomattavasti pienempi kuin kermiltä vaadittava tartuntavetolujuus. Kermin tartuntavetolujuus voidaan mitata vain, jos kermin ja alustan lämpötila on alle 25 C°. 100 mm asfalttikerroksesta aiheutuu kuitenkin vain noin 0,02 MPa pintapaine, joka jää 50 C° vesihöyrynpainetta pienemmäksi. Vedeneristeen hyvä tartunta epoksitiivistykseen on tärkeä osa kuplimisen ehkäisyä. [10, 16, 40]

Suurimmat lämpökuormat betoniin, epoksitiivistykseen ja vedeneristyskermeihin syntyvät kermien asennuksessa, auringon säteilystä ennen asfaltin asennusta ja asfaltin asennuksesta. Asfaltin asennuksen jälkeen betonipinnan lämpötila ei nouse enää yhtä korkealle asfaltin eristävyys takia. Alkuvaiheen suurimmat lämpökuormat eivät kuitenkaan yksinään selitä kuplimista, koska kupliminen voi tapahtua vuosia sillan käyttöönoton jälkeen [16]

Kesäisin, kun lämpötila muuttuu vuorokausirytmien mukaan, vaihtelee myös vesihöyryn aiheuttama paine kuplien sisällä. Lämpötilan vaihtelu aiheuttaa pumppaamista muistuttavan efektin kuplissa, kun vesihöyryn paine nousee ja laskee lämpötilan mukaan. Lämpötilasta johtuva paineen kasvu voidaan laskea yleisen kaasun tilanyhtälön mukaan seuraavalla kaavalla

$$pV = nRT, \quad (1)$$

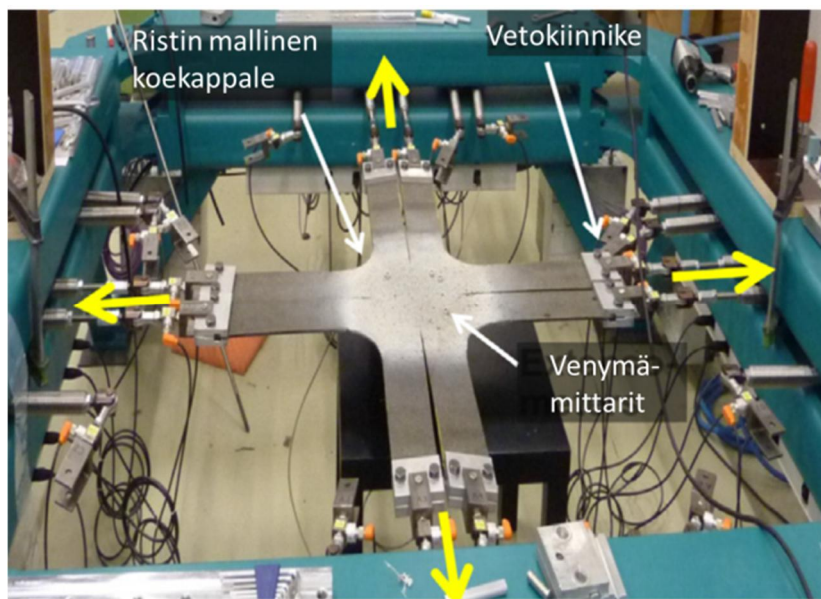
missä  $p$  = paine kuplassa;  $V$  = kuplan/kaasun tilavuus;  $n$  = kaasun ainemäärä;  $R$  = yleinen kaasuvakio (= 8,314 J/(Kmol)) ja  $T$  = lämpötila.

Vedeneristeen tartuntalujuus ja vesihöyrystä aiheutuva paine eivät ole suoraan verrattavissa keskenään, koska kermin irrotusmekanismi kuplimisessa on erilainen. Vetokohteessa veto tapahtuu kohtisuorasti kiinnityspintaan nähden, kun taas vesihöyrystä aiheutuva irrotusmekanismi on sekoitus vetoa keskeltä kohtisuoraan ja reunoilta viistosti epok-

sipintaan nähden. Tästä aiheutuu myös venymistä kermin pituussuunnassa ja vesihöyrynpaine vaikuttaa myös suoraan liimausbitumiin kuplan reunoilla. Tilavuuden kasvusta ja pienenemisestä johtuva pumppausliike aiheuttaa väsyttävän murtomekanismin vedeneristyskermin tartuntaan. [12]

Toinen pumppaamisilmiö syntyy, kun ajoneuvot ajavat kuplineen pintarakenteen yli ja renkaat kulkevat kuplien päältä. Ajoneuvon ajaessa kuplan päältä puristuu kermi betonipintaa vasten ja pienentää kuplan tilavuutta. Tilavuuden pienentyessä paine kuplan sisällä kasvaa ja aiheuttaa rasisusta kuplan reunoihin. Vedeneristyskermit voivat myös puhjeta ajoneuvojen aiheuttaman rasisuksen seurauksena, jos kermin tartunta ei irtoa alustasta. [32]

Kuplan muodostumistutkimuksissa kumibitumikermeillä tehdyillä tutkimuksilla on saatu selville, että kermin alle muodostuvan kuplan geometria on likimain ellipsi. Kermin materiaaliominaisuudet ovat erilaiset pituus- ja leveysuunnassa. Kuplan pituus- ja leveysuuntainen kasvun suhde on verrattavissa kermin pituus- ja leveysuuntaiseen kimmokerrotoimien suhteeseen. Kaksiakselisella testillä (kuva 13) saadaan selvitettyä kermin pituus- ja leveysuuntaisia materiaaliominaisuuksia. [12]

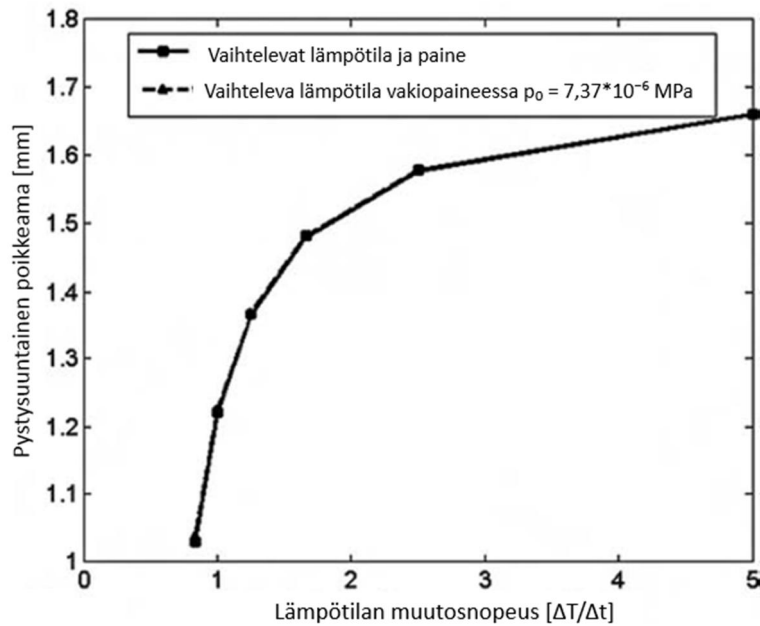


Kuva 13. Kaksiakselinen venytystesti. Kulmien leikkaussäde (75 mm) on valittu mallituksen perusteella. Keltaiset nuolet kuvaavat vetoa. [12].

Todellisuudessa voimia esiintyy myös muissa suunnissa kuin suoraan pituus- ja leveysuunnassa, mutta kaksiakselisella menetelmällä saatava elliptinen muoto on lähempänä todellisuutta kuin vain yhteen suuntaan tarkasteltava tilanne. [12]

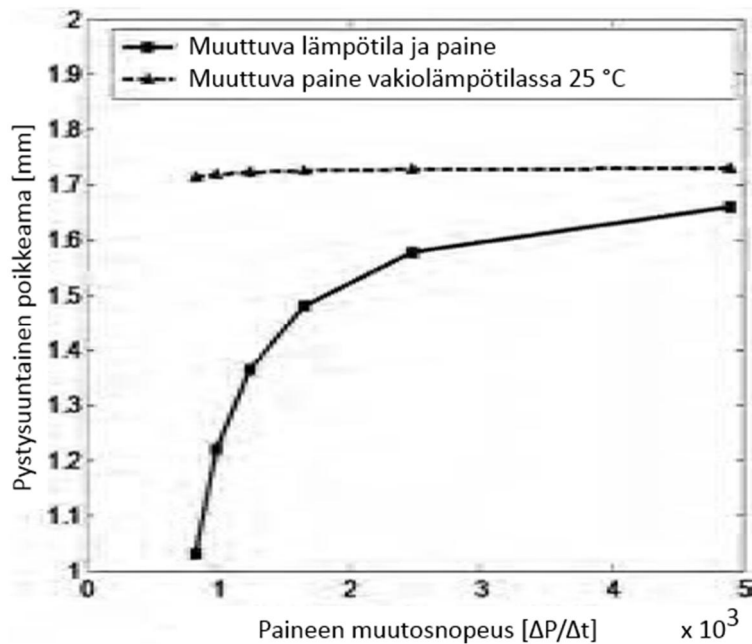
Mastiksiasfalttitutkimuksissa FEM-simuloinnilla saadut tulokset osoittavat, että lämpötilan vaihtelulla on merkittävä vaikutus asfaltin kuplimiseen. Tutkimuksen mukaan kuplat voivat kasvaa vielä lämpimien päivien jälkeenkin. Lämpötilan vaihtelulla on suurempi merkitys kuplan kasvuun kuin kuplan sisällä olevan paineen vaihtelulla. Kuvasta 14 voidaan havaita, että lämpötilan nousulla on merkittävä vaikutus kuplan korkeuden kasvuun. Lähes koko mastiksiasfaltin kuplan korkeuden nousu johtui lämpötilan noususta. Lämpötilasta johtuva korkeuden muutos oli samaa suuruusluokkaa kuin lämpötilan ja paineen noususta johtuva muutos. [11]



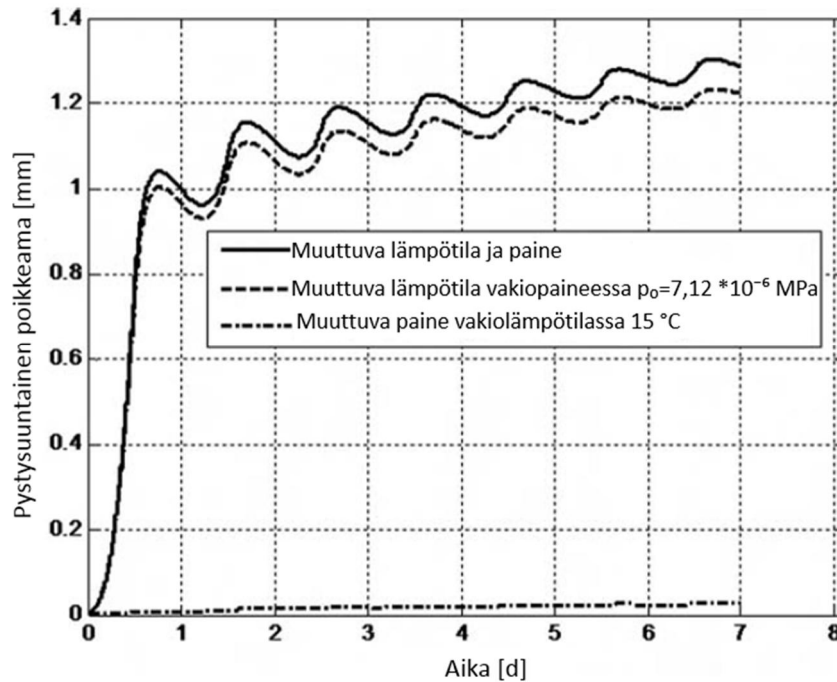


Kuva 14. Lämpötilan muutosnopeus suhteessa levyn keskipisteen pystysuuntaiseen poikkeamaan. [11]

Kuvasta 15 voidaan havaita, ettei paineen kasvulla ole merkittävää vaikutusta MA:n kuplan pinnan korkeuden muutokseen. Pelkästään paineen muutoksesta johtuva pinnan korkeuden muutos on selkeästi pienempi kuin paineen ja lämpötilan samanaikaisesta vaihtelusta johtuva muutos. (kuva 15). Kuvassa 16 on havaittavissa, että jatkuvat lämpötila- ja painesyklit voivat aiheuttaa kuplan jatkuvan kasvun. Kuplan kasvu hidastuu syklien lukumäärän kasvaessa. Tämä vastaa käytännön havaintoja, koska isoja suunnilleen samankokoisia kuplia silloilla on yleensä vähemmän kuin pieniä kasvavia kuplia. [11]



Kuva 15. Paineen muutosnopeus suhteessa keskikohdan pystysuuntaiseen poikkeamaan. [11]



Kuva 16. Mastiksiasfaltin keskikohdan pystysuuntainen poikkeama toistetuilla lämpötila ja paine kierrolla 7 päivän ajan. Kierro koostui 12 tunnin lineaarisesta paineen ja lämpötilan noususta ja 12 tunnin lineaarisesta laskusta. [11]

Ajasta riippuva korkeuden muutos mastiksiasfalttipäällysteessä riippuu mallinnuksen mukaan kolmesta tekijästä: mallinnuksessa käytettävistä materiaaliominaisuuksista, MA:n lämpötilasta rasituksen alkaessa sekä nopeudesta, jolla paine kasvaa kuormituksen aikana. Mallinnuksessa lämpötilalla on suurempi vaikutus korkeuden muutokseen kuin paineella. Kahdentoista tunnin simulaatio on osoittanut, että hitaasti ja tasaisesti aiheutettu paineen ja lämpötilan nousu aiheuttavat suhteellisen pienen muutoksen korkeudessa. Tasaisella paineella ( $p_0 = 7,12 \cdot 10^{-6}$  MPa) ja vaihtelevalla lämpötilalla sekä MA:n lämpötilariippuvuudella on suuri merkitys korkeuden muutokseen. Tämä osoittaa, että vakio-paine kuplassa voi muodostaa merkittävän osan kuplan kasvusta, kun lämpötila nousee. Toisaalta vesihöyryn paine kasvaa lämpötilan noustessa eli varsinaisesta vakio-paineesta ei ole kyse. Vakio-lämpötila ja vaihteleva paine aiheuttavat paljon pienemmän kuplan kasvun. Tämä johtuu siitä, että MA:n jäykkyys viileämpänä vastustaa paineen aiheuttamaa muodonmuutosta. Simulaatiossa, jossa oli perättäisiä syklejä lämmitystä ja jäähdytystä, havaittiin että päivittäisellä lämpötilan vaihtelulla on suuri vaikutus asfalttipäällysteen kuplimiseen. Kun paine ja lämpötila pienenevät, voi kuplan kasvu jatkua edelleen, mutta hitaampana kuin rasituksen aikana. Simulaatio osoitti, että kuplan kasvu voi jatkua taukoamatta rasitusyhteyksien jälkeisinä päivinä. [11]

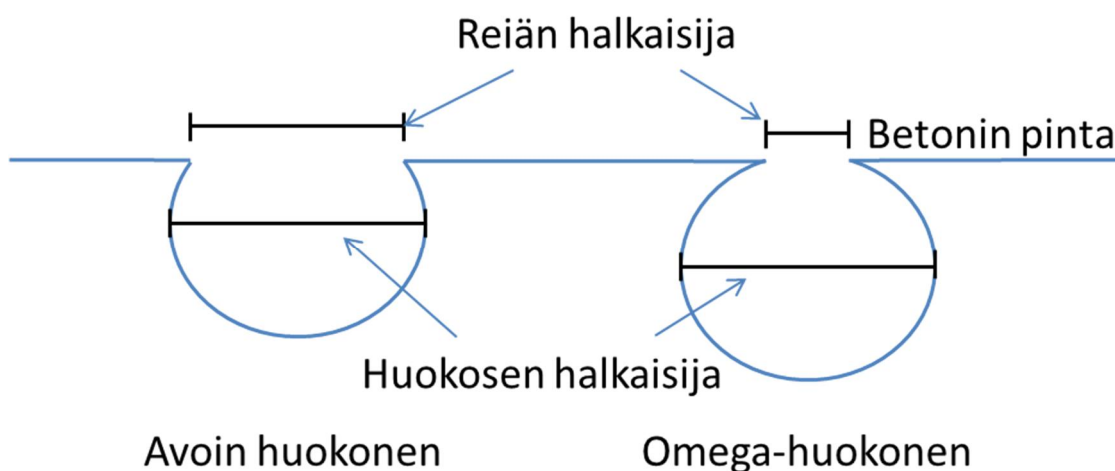
### 3.2 Epoksitiivistyksen epäjatkuvuuskohdat

Epoksitiivistyksen tehtävänä on estää vesihöyryn pääsy vedeneristyskermin alle. Jotta tämä tehtävä täyttyisi, tulee epoksitiivistyksen olla täysin yhtenäinen eikä siinä saa olla epäjatkuvuuskohtia kuten reikiä tai halkeamia. Jotta vesihöyryn läpäisy estyisi, täytyy epoksikerroksen olla riittävän paksu eikä se saa olla koostumukseltaan huokoinen.

#### 3.2.1 Reikiintyminen

Tiivistystyön yhteydessä epoksitiivistykseen saattaa jäädä epäjatkuvuuskohtia. Näissä kohdissa epoksitiivistys saattaa olla niin ohut, että tiivistykseen on jäänyt työn yhteydessä

kohtia, joissa on periaatteessa paljas betonipinta. Sementtiliimasta puhdistetussa betonipinnassa on avoimia huokosia. Huokokset voivat olla joko kokonaan auki tai niin sanottuja omega-huokosia (kuva 17). Avoimilla huokosilla tarkoitetaan tässä yhteydessä huokosia, joissa on huokosen kokoon nähden suuri reikä betonipinnassa eli reiän halkaisija on lähes yhtä iso kuin huokosen halkaisija. Omega-huokonen on suuri huokonen, johon johtaa pieni reikä. Eli huokosen tilavuus betonipinnassa näkyvään reikään nähden on suuri ja reiän halkaisija on selvästi pienempi kuin huokosen halkaisija. [42]



Kuva 17. Avoin huokonen ja omega-huokonen betonin pinnassa.

Epoksi tunkeutuu avoimeen huokoseen hyvin, koska reikä on suhteessa suuri huokosen tilavuuteen verrattuna, joten ilma pääsee poistumaan epoksin alta nopeammin. Kun epoksia levitetään omega-huokosen yli, saattaa huokosessa oleva paine mahdollistaa epoksin silloittumisen niin, että reiän päälle jää epoksikalvo. Toisen epoksitiivistyskerroksen levitys voi aiheuttaa reiän aukeamisen huokoseen. [53]

Epoksitiivistykselle on materiaalivalmistajien toimesta määritetty kovettumisaika, jota ennen tiivistystä ei saisi kuormittaa tai asentaa vedeneristystä sen päälle. Eräällä epoksilla kovettumisaika on 24 tuntia ennen kermieristyksen asennusta, kun lämpötila on + 30 °C. Kymmenen asteen lämpötilassa (+10 °C) kermieristys saa asentaa 60 tunnin kuluttua. Todellisuudessa kermieristys asennetaan useimmiten seuraavana epoksitiivistyksen paikkaamisen jälkeisenä päivänä. Kesällä, kun lämpötila on + 25 °C, epoksitiivistystyöt suoritetaan illalla tai yöllä ja kermieristys yleensä seuraavana päivänä noin kello kahdeksasta eteenpäin. Tämä tarkoittaa paikkausepoksille maksimissaan 12 tunnin kovettumisaikaa. Kaikille epoksille ei ole määritelty kovettumisaikaa ennen kermien asennusta, vaan esimerkiksi kovettumisaika on määritelty ennen suoja-asfaltin asennusta. Jos kermieristys asennetaan ennen epoksin riittävää kovettumista, saattaa paikkausten jälkeen yhtenäiseksi todettuun epoksitiivistykseen syntyä reikiä huokosilman lämmitessä ja laajentuessa. Näitä mahdollisia reikiä epoksitiivistyksessä ei pystytä havaitsemaan, koska ne ovat kermieristyksen alla piilossa. [3, 44]

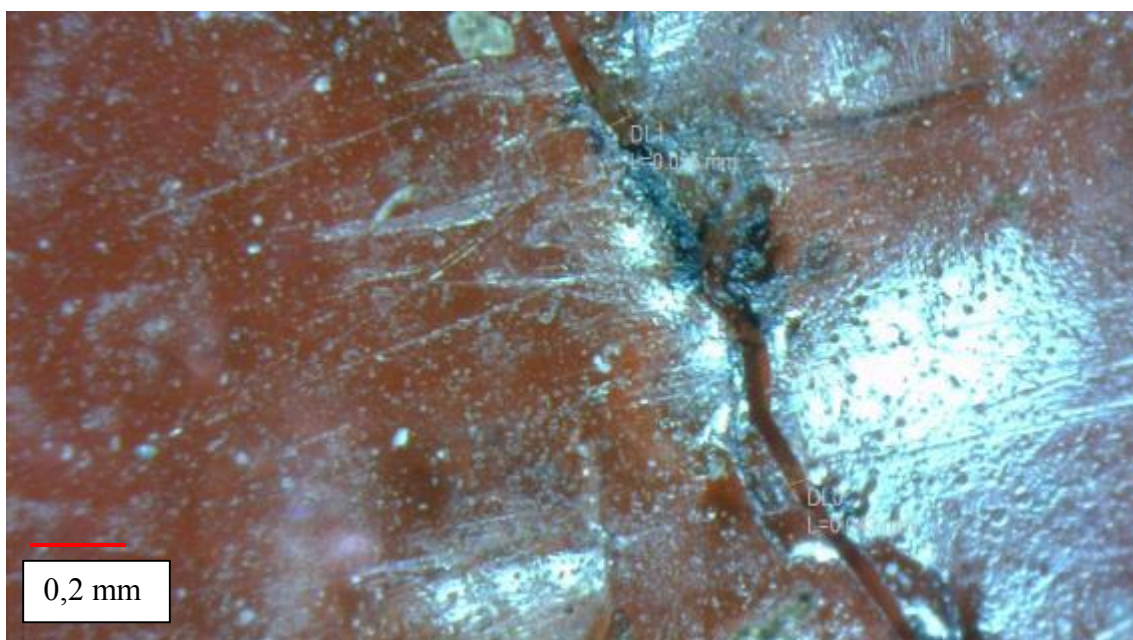
### 3.2.2 Halkeilu

Kovettuneen epoksin tartuntavetolujuuden keskiarvon sillalla tulee olla vähintään 1,5 N/mm<sup>2</sup>. Tämä lujuusvaatimus koskee vain tartuntaa betonipintaan, mutta asettaa samalla vaatimuksen myös epoksin vetolujuudelle. [23] Liikenneviraston ohjeissa ei ole määri-

telty vaatimuksia tiivistysepoksin muodonmuutoskyvyille. Tästä johtuen siltakannella tapahtuvista muodonmuutoksista ja halkeiluista seuraavia voimia vastaan epoksitiivistykselle ei ole vaatimuksia ohjeissa. Kovettunutta epoksia kuvataan yleisesti sanalla lasimainen eli se ei kestä suuria muodonmuutoksia, vaan halkeaa rasituksessa. Siltakannella tapahtuvat muodonmuutokset ja halkeilu saattavat siis aiheuttaa halkeamia myös epoksiin, jolloin epoksitiivistyksen vesihöyrytiiveys menetetään. Kuvissa 18 ja 19 on esitetty epoksin halkeamia kuplakohdista, joista on purettu pintarakenteet pois ennen epoksitiivistyksen korjausta.



*Kuva 18. Epoksitiivistyksessä ja siltakannessa näkyvä halkeama. (kuva: Tomi Keinänen)*



*Kuva 19. Halkeama epoksitiivistyksessä. Halkeaman leveys on noin 0,4 – 0,5 mm. Punainen viiva kuvan alalaidassa vastaa todellisuudessa 0,2 mm pituutta. (kuva: Tomi Keinänen)*

Mahdollisia syitä betonisen siltakannen halkeamiin ovat muun muassa betonin viruma ja kuivumiskutistuminen. Taivutus, rakenteen jännitys, leikkausrasitus, epätasainen painuminen tai suuret muodonmuutokset voivat myös olla syitä halkeiluun. [20] Kaikki nämä halkeamia aiheuttavat voimat voivat periaatteessa rikkoa epoksitiivistyksen yhtenäisyyden.

### 3.2.3 Kannen betonin ominaisuudet

Siltakannen betonille on asetettu laatuvaatimukset pakkaskestävyydelle. Vedeneristetty siltakansi, jonka KVL > 1500, kuuluu rasitusluokkaryhmään R1. Lujuusluokan vaatimus on C30/37, P-lukuvaatimus P30, vähimmäisementsimäärä on 300 kg/m<sup>3</sup> ja vesi-sementtisuhteen enimmäisarvo on 0,50. Siltarakenteiden betonin laatuvaatimukset on esitetty taulukossa 1.[21]

*Taulukko 1. Betonirakenteiden vähimmäisvaatimukset siltaosittain eri rasitusluokka ryhmissä, päällysrakenne ja reunapalkit [21]*

Sillan osa	Sillan osan tunnus	Rasitusluokkaryhmä	Vaatimukset						Suunnittelukäyttöikä	Betonipintojen suojaus
			Lujuusluokka	P-lukuvaatimus	Vähimmäisementsimäärä [kg/m <sup>3</sup> ]	Vesi-sementtisuhteen enimmäisarvo	Betonipeitteen nimellisarvo [mm]	Raudoitustyyppi 1)		
Päällysrakenteen palkkien ja kansilaattojen vedeneristeen alla olevat pinnat sekä muut ei suolasumurasitetut pinnat 2)	Ro20	R1	C30/37	P30	300	0,50	40 50	tr jr	100	
		R2	C30/37	P20	300	0,50	40 50	tr jr	100	
		R4	C30/37	P20	300	0,55	40 50	tr jr	100	
		R1	C30/37	P30	300	0,50	45 55	tr jr	100	3)
		R2	C30/37	P20	300	0,50	40 50	tr jr	100	3)
		R3	C30/37	P30	300	0,45	40 50	tr jr	100	3)
Päällysrakenteen ja maatukien reunapalkit. Suojabetoni; ei 4)	Ro22	R1	C35/45	P50	320	0,45	45 55	tr jr	50	4)
		R2	C30/37	P50	300	0,50	40 50	tr jr	50	4)
		R3	C35/45	P30	320	0,45	45 55	tr jr	50	4)
		R4	C30/37	P30	300	0,55	40 50	tr jr	70	
		R1 R2	C30/37	P50	300	0,50	40 (5) 50	tr jr	50	
		R3	C30/37	P30	300	0,50	40 (5) 50	tr jr	50	
		R4	C30/37	P30	300	0,55	40 (5) 50	tr jr	70	
		R1 R2	C30/37	P50	300	0,50	40 (5) 50	tr jr	50	

P-lukuvaatimus asettaa ehtoja betonin ilmamäärälle. Tiehallinnon Siltabetonien P-lukumenettely – julkaisussa on esitetty vaatimukset P30-luvun täyttymiselle. Ennakko-kokein tehtävät P-luvun määrittelyssä on asetettu vaatimukset muun muassa betonin kokonaisilmamäärälle sekä huokosjaolle. Huokosjaon vaatimukset on esitetty taulukossa 2. P30-luvun betonille huokosjaon suurin sallittu arvo on 0,25 mm, kun vesi-sementtisuhde on  $\leq 0,40$  ja 0,30mm, kun vesi-sementtisuhde on  $> 0,40$ . [21]

*Taulukko 2. Huokosjakovaatimukset eri P-lukutasoilla ja vesi-sementtisuhteen arvoilla [21]*

Vesi-sementtisuhde	Huokosjakovaatimus eri P-lukutasoilla [mm]	
	P < 50	P $\geq$ 50
> 0,40	$\leq 0,25$	$\leq 0,23$
$\leq 0,40$	$\leq 0,30$	$\leq 0,27$

Siltakansien betonimassalle on määritetty vähimmäisilmamäärävaatimus ja ohjeellinen enimmäisilmamäärä eri P-lukuluokissa. Esimerkiksi 0,40 vesisementtisuhteella valmistetun P30-luokan betonimassan, jonka kiviaineksen maksimiraekoko on  $\geq 16$  mm, vähimmäisilmamäärä on kolme prosenttia ja ohjeellinen enimmäisilmamäärä viisi prosenttia. Tämän lisäksi on määritetty, että ilmamäärän yläraja on suhteituksen ilmamäärä, johon on lisätty neljä prosenttia. Taulukossa 3 on esitetty ilmamäärän vähimmäisvaatimuksia ja ohjeellisia enimmäismääriä betonimassalle, jonka kiviaineksen maksimiraekoko on  $\geq 16$  mm. [21]

*Taulukko 3. Betonimassan vähimmäisilmamäärävaatimukset ja ohjeellinen enimmäisilmamäärä eri pakkasenkestävyysluokissa, kun kiviaineksen yläraja  $\geq 16$  mm [21]*

Vesi-sideainesuhde	Ilmamäärän vähimmäisarvo ja ohjeellinen ilmamäärän enimmäisarvo eri pakkasenkestävyysluokissa			
	P20	P30	P50	P70
0,60	5 – 7 %	5 – 7 %	-	-
0,50	3 – 5 %	4 – 6 %	6 – 8 %	-
0,40	2 – 4 %	3 – 5 %	4 – 7 %	(7 – 9 %) <sup>1)</sup>
0,32	2 – 4 %	2 – 4 %	2 – 5 %	3 – 5 %
<0,32	ei vaat.	ei vaat.	ei vaat.	ei vaat.

<sup>1)</sup> Vain interpolointia varten

InfraRYL 2006 osa 3:ssa on asetettu betonityön vaatimuksiin ilmamäärän mittaus työmaalla betonointityön yhteydessä. Lisäksi betonin kuljetus työmaalle on määrätty toteutettavaksi niin, ettei betonissa tapahdu kuljetuksen aikana erottumista tai muuta betonin ominaisuuksia muuttavaa ilmiötä. [38]

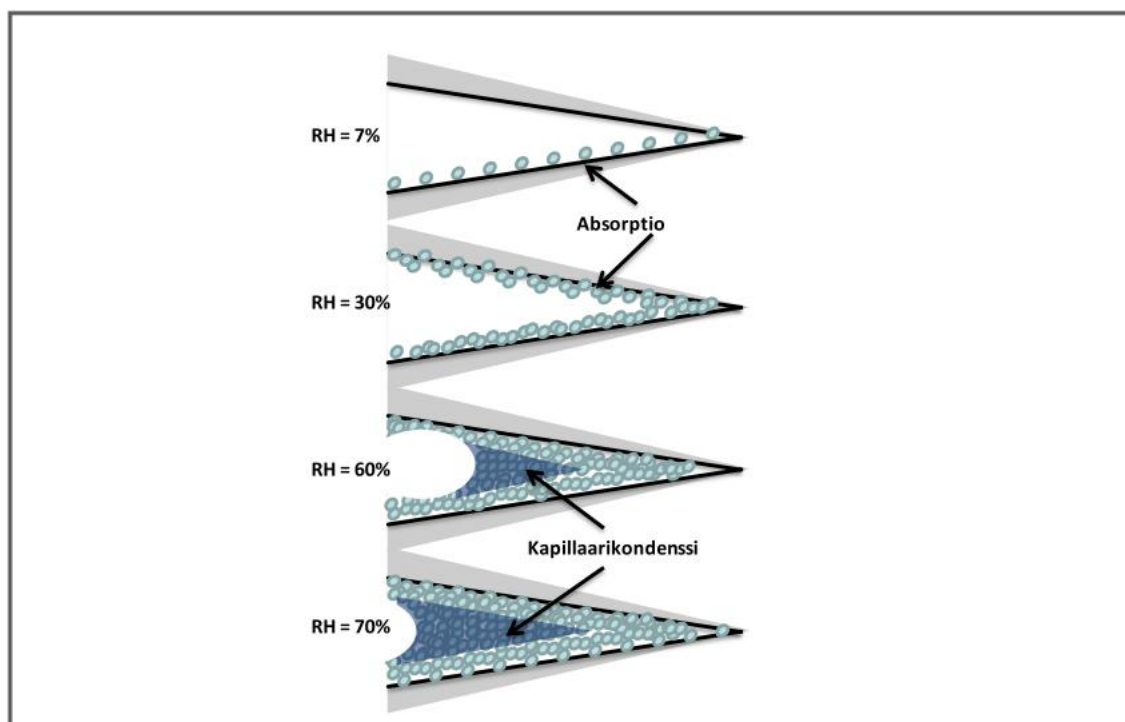
### 3.2.4 Betonikannen kosteustasapainon kehittyminen

Betonisessa siltakannessa on aina jonkin verran kosteutta. Kosteus on suurimmaksi osaksi peräisin betonin valmistuksessa käytetystä vedestä, mutta jossain tapauksissa kansilaatta on voinut myös kastua sääsuojan vuotaessa. Betoni myös absorboi kosteutta sääsuojan sisällä olevasta ilmasta, jos sääsuojan olosuhteisiin ei kiinnitetä huomiota, vaan ilman suhteellinen kosteus pysyy korkeana. [1, 16, 26]

Sementti hydratoituu sementtiliimaksi reagoidessaan veden kanssa. Hydrataatio tarvitsee kuitenkin vain noin 25 % vettä sementin määrästä. [30, 35] Hydrataation tarvitsemaan vesimäärään vaikuttavat muun muassa vesi-sideainesuhde, sementtilaatu ja rakenteen

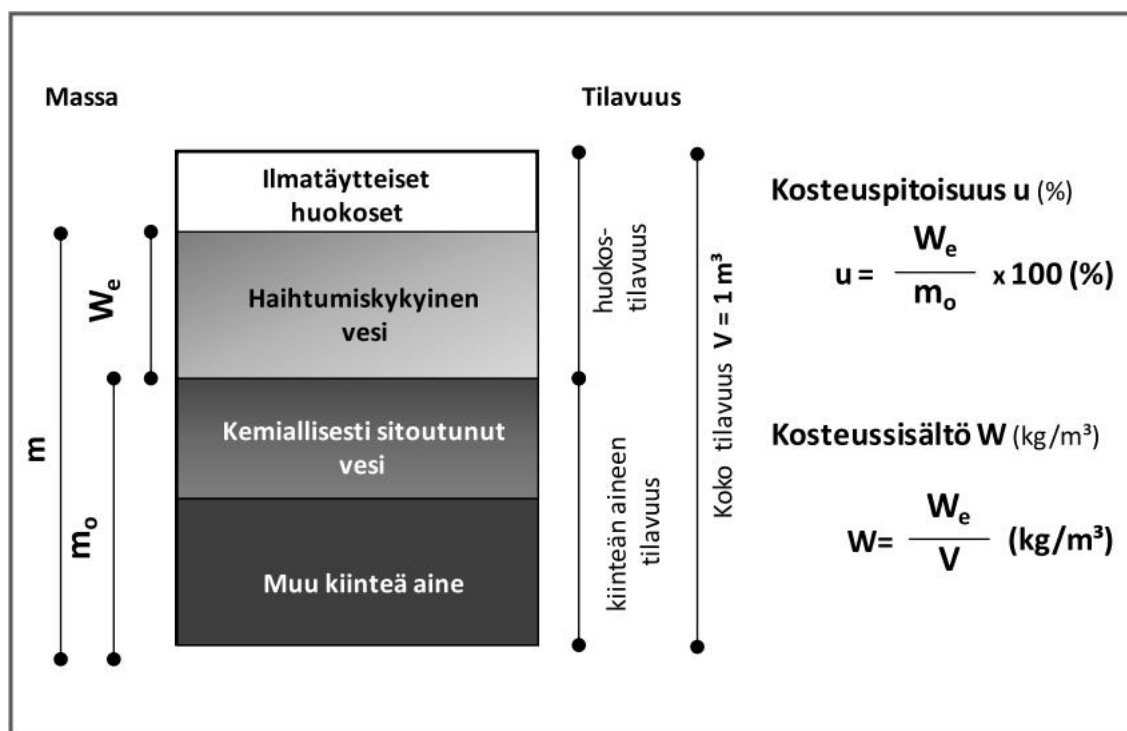


lämpötila. Betonin valmistuksessa käytetään usein enemmän vettä kuin betonin täydellinen hydrataatio vaatisi. Lisävedellä parannetaan muun muassa betonin työstettävyyttä. Vesimäärää voitaisiin pienentää käyttämällä lisäaineita, jotka parantavat betonin työstettävyyttä, mutta nämä lisäaineet ovat kalliita verrattuna veteen. [7, 27, 35] Ylimääräinen vesi, joka ei kulu hydrataatiossa, sitoutuu betoniin fysikaalisesti huokosten pinnalle vesimolekyylikerroksena ja kapillaarikondenssin vaikutuksesta (kuva 20) [2]. Vesimolekyylikerroksen lisäksi huokosissa on kosteutta myös huokosilmassa. Huokosilman kosteuspitoisuus kasvaa molekyylikerroksen kasvaessa eli kun betonin kosteuspitoisuus kasvaa. Huokosilman kosteuspitoisuus ilmoitetaan suhteellisen kosteuden avulla. Suhteellinen kosteus on lämpötilasta ja vesihöyryn osapaineesta riippuva huokosilman prosentuaalinen kosteus sen maksimi kosteuskapasiteetista. [27]



Kuva 20. Kun suhteellinen kosteus kasvaa betonissa, kasvaa huokosseinämiin absorboitunut ja kapillaarisesti sitoutunut veden määrä. [2]

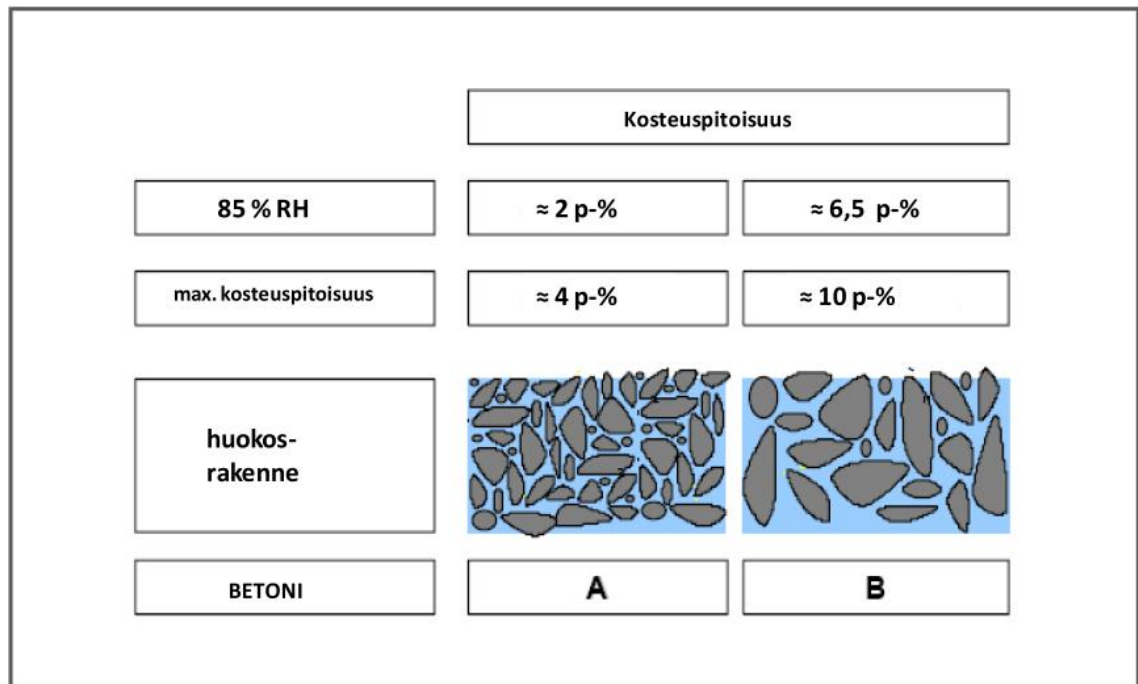
Kemiallisesti sitoutunut vesi sitoutuu betoniin nimensä mukaisesti kemiallisissa reaktioissa betonin hydratoituessa. Kemiallisesti sitoutunut vesi haihtuu betonista vasta korkeassa lämpötilassa. Esimerkiksi 105 °C uunin lämpötilassa kuivatus-punnitusmittauksen yhteydessä kemiallisesti sitoutunut vesi ei vielä haihdu. Fysikaalisesti sitoutunut vesi on betonin huokosrakenteessa olevaa vettä, joka liikkuu rakenteessa olosuhteiden muuttuessa. Fysikaalisesti sitoutunut vesi pyrkii poistumaan rakenteesta ja vaikuttaa epoksitiivistyksen tartuntaan. Betonin kosteuspitoisuus pyrkii hygroskooppiseen tasapainotilaan ulkoilmassa vallitsevan kosteuden kanssa. Tästä seuraa potentiaallieroja, joiden vaikutuksesta betonissa oleva fysikaalisesti sitoutunut vesi haihtuu ulkoilmaan. Betonin kosteuspitoisuudella tarkoitetaan yleensä nimenomaan normaaliolosuhteissa kuivumiskykyistä eli fysikaalisesti sitoutunutta vettä. Kosteus voidaan ilmoittaa kosteuspitoisuutena painoprosentteina betonin kuivapainosta (m-%), joka voidaan mitata kuivatus-punnitusmenetelmällä tai kosteussisältönä betonin tilavuuden suhteessa ( $\text{kg/m}^3$ ) (kuva 21). [16, 27, 29]



Kuva 21. Periaatteellinen kuva betonin koostumuksesta.  $u$  on betonin kosteuspitoisuus. Kosteuspitoisuus ilmoittaa betonissa olevan haihtumiskykyisen veden massan suhteen betonin kiinteän aineen massaan prosentteina.  $W$  on betonin kosteussisältö. Kosteussisältö voidaan ilmoittaa myös haihtumiskykyisen veden massan ja betonin koko tilavuuden suhteena. [5]

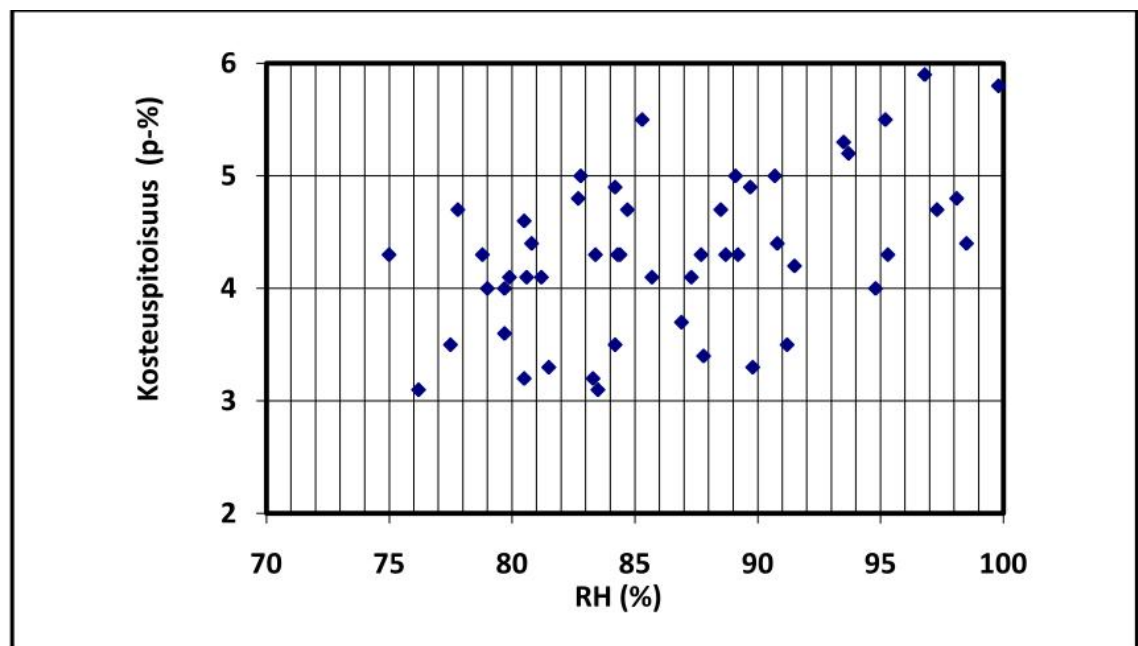
Betonin kosteuspitoisuutta voidaan mitata myös suhteellisen kosteuden (RH-%) menetelmällä. Menetelmässä mitataan betonin huokosissa olevan ilman suhteellista kosteutta. Suhteellinen kosteus määräytyy vesihöyryn määrän ja lämpötilan perusteella. Suhteellisen kosteuden mittaaminen ei suoraan huomioi betonin huokosten pinnassa olevaa vesimolekyylikerrosta, mutta vesimolekyylikerroksen paksuuteen vaikuttaa huokosilman kosteussisältö. Suhteellisen kosteuden noustessa molekyylimerkki kasvaa ja laskiessa ohenee. Suhteellisen kosteuden ja absoluuttisen kosteuden välille voidaan määrittää sorptiokäyrä eli hygroskooppinen tasapainokosteuskäyrä. Käyrän avulla voidaan verrata betonin suhteellista kosteutta ja absoluuttista kosteutta. [27] Betonin suhteellisen kosteuden ja absoluuttisen kosteuden vertailu ilman sorptiokäyrää tai vastaavaa taulukkoa on periaatteessa mahdotonta, koska betonin ominaisuudet vaikuttavat kosteussisältöön niin paljon. Kahden eri betonin, joiden suhteellinen kosteus on sama, absoluuttinen kosteus voi erota useita prosentteja. Esimerkiksi betonin, jossa on vähän huokosia, suhteellisen kosteuden ollessa 85 RH-% sen absoluuttinen kosteus voi olla 2 m-%. Kun taas erittäin huokoisen betonin suhteellisen kosteuden ollessa 85 RH-% sen absoluuttinen kosteus voi olla esimerkiksi 6 m-%. Lämpötilalla on merkittävä vaikutus suhteellisen kosteuden arvoon. Lämpötilan noustessa betonin huokosten seinämissä oleva vesimolekyylikerros alkaa haihtua huokosilmaan ja suhteellinen kosteus nousee. Vastaavasti lämpötilan laskiessa huokosilman suhteellinen kosteus laskee vesihöyryn sitoutuessa huokosten seinämien vesimolekyylikerrokseen. Betonin suhteellinen kosteus ei siis kerro, mikä betonin todellinen kosteuspitoisuus on. Myös maksimikosteuspitoisuudet voivat vaihdella betonien välillä huomattavasti. Toiselle betonille 4 m-% kosteus on huomattavan korkea, kun taas toiselle betonilaadulle se voi olla alhainen (kuva 22). [26, 27 31]





Kuva 22. Erilaisten betonien maksimikosteuspitoisuus ja tasapainokosteuspitoisuus samassa suhteellisessa kosteudessa voivat olla erisuuria johtuen betonien erilaisesta huokosrakenteesta. [26]

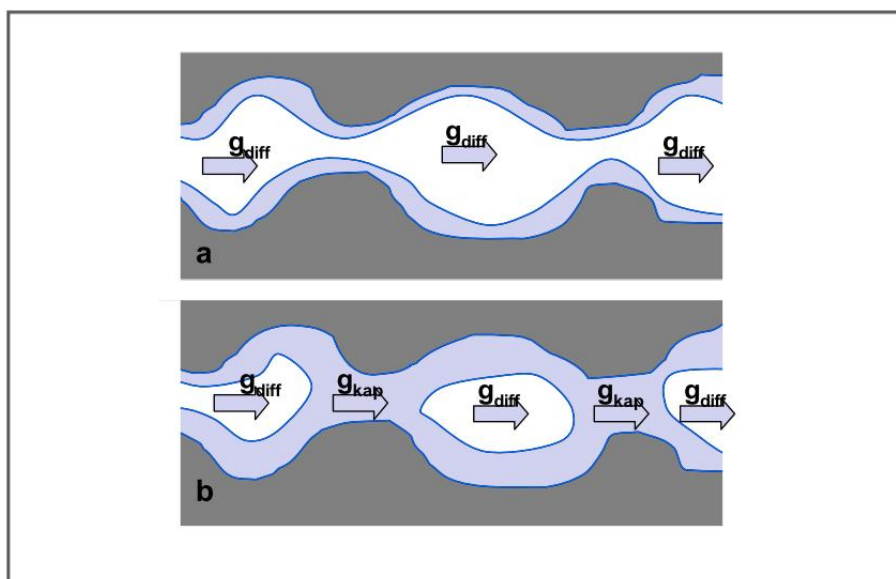
Vastaavia havaintoja on tehty muissakin tutkimuksissa. Betonin absoluuttisen kosteuden ollessa noin 4 m-% voi suhteellinen kosteus olla jollain betonilla noin 80 RH-% ja toisella jopa 95 RH-% (kuva 23). [4]



Kuva 23. Betonin suhteellisen kosteuden RH-% ja absoluuttisen kosteuden m-% (p-%) suhde erilaisille betonilaaduille eri iässä. [4]

Kuivuminen voidaan jakaa kahteen eri menetelmään, kemialliseen kuivumiseen ja haihtumiskuivumiseen. Betonissa hydrataation yhteydessä tapahtuvaa veden kulumista kutsutaan yleensä kemialliseksi kuivumiseksi. Mitä enemmän betonissa on sideainetta suhteessa veteen eli mitä pienempi vesi-sideainesuhde, sitä enemmän vettä kuluu hydrataatiossa ja kemiallisen kuivumisen osuus on suurempi. Normaleilla rakennebetoneilla kemiallisella kuivumisella saavutetaan vain noin 98 RH-% suhteellinen kosteus. Tällaisessa tapauksessa betonin pitää kuivua myös haihtumiskuivumisella, jotta epoksitiivistys voidaan levittää. Betonin ominaisuudet vaikuttavat betonin kuivumiseen. Vesi-sideainesuhteen ollessa alhainen voidaan saavuttaa jopa 90 RH-% suhteellinen kosteus vain kemiallisella kuivumisella. Tällaisesta betoneista voidaan käyttää nimitystä itsestään kuivuva betoni. [16, 27, 33, 34]

Betonin suhteellisen kosteuden jäädessä korkeaksi kemiallisen kuivumisen jälkeen, pitää rakenteen kuivua haihtumalla. Haihtuminen on mahdollista, kun siltakannta ympäröivän ilman vesihöyryn osapaine on alhaisempi kuin betonin huokosissa olevan vesihöyryn osapaine. Tällaisessa tilanteessa haihtumiskykyinen vesi pyrkii tasapainotilaan ympäröivän ilman kanssa. Betonin kuivumiseen betonin ominaisuuksien lisäksi vaikuttaa jälkihoito, rakenteen paksuus, haihtumispinta-ala, rakenteen lämpötila ja ympäröivän ilman olosuhteet. Haihtumiskuivuminen tapahtuu rakenteen pinnasta. Kun rakenne kuivuu pinnastaan, alkaa syvemältä rakenteesta kulkeutua kosteutta pintaa kohti kosteuden hakiessa tasapainotilaa. Pinnan ollessa märkä tapahtuu haihtumista nopeasti. Suhteellisen kosteuden ollessa vähintään 97 RH-% tapahtuu kosteuden siirtyminen kapillaarisesti kohti pintaa. Pinnan kuivuessa alle 97 RH-% kapillaarinen kosteuden siirtyminen estyy ja kosteuden siirtyminen muuttuu diffuusioksi. Diffuusiolla tapahtuva kuivuminen on huomattavasti hitaampaa kuin kapillaarisesti tapahtuva kosteuden siirtyminen. Pintaosan kuivuessa syvempää siirtyy myös rintama, jossa kuivuminen muuttuu kapillaarisesta diffuusioksi eli vesi alkaa haihtua. Haihtumisrintaman siirtyessä syvemmälle rakenteen kuivuminen hidastuu. [14, 27, 30]



Kuva 24. Kosteuden siirtyminen betonissa. Kuvassa a on kuvattu kosteuden siirtymistä alhaisessa suhteellisessa kosteudessa, jolloin kosteus siirtyy vain diffuusiolla. Kuvassa b on korkea suhteellinen kosteus, jolloin kosteutta siirtyy sekä diffuusiolla että kapillaarisesti. [43]

Betonin kosteudensiirto-ominaisuuksiin vaikuttaa betonin koostumus ja olosuhteet. Vesi-sideainesuhteen ollessa matala on betonin huokosrakenne yleensä tiiviimpää ja kosteuden siirtyminen tapahtuu hitaasti. Betonin lämpötilan nousu nostaa huokosissa olevan vesihöyryn osapainetta ja potentiaalieron kasvaessa ulkoilmaan kosteuden siirtyminen nopeutuu. Ympäröivän ilman lämmitessä ilman suhteellinen kosteus laskee ja se pystyy sitomaan enemmän kosteutta betonista. [13, 14, 16, 25, 27, 30]

## 4 KENTTÄKOKEET

Tässä tutkimuksessa tehdyt kenttäkokeet ovat koostuneet uudissillakohteissa tehtävistä laadunvarmistuskokeista ja muista tutkimuksista sekä työmaaolosuhteiden havainnoinneista. Kenttäkokeiden tavoitteena oli selvittää, miten laadunvarmistusmittaukset suoritetaan ja millaisia käytännön ongelmia mittauksissa voi tulla vastaan. Lisäksi tavoitteena oli selvittää, onko suoritettavat mittaukset riittäviä ja tarkoituksen mukaisia. Kenttäkokeiden kosteusmittauksilla vertailtiin absoluuttisen ja suhteellisen kosteuden mittaamenetelmällä saatavia tuloksia ja niiden luotettavuutta. Taulukossa 4 on esitetty InfraRYL osa 3:ssa vaaditut laadunvarmistusmittaukset sekä diplomityössä suoritettut lisämittaukset.

*Taulukko 4. Mittausalueelle suoritettut mittaukset (Urakoitsija suoritti eristysalustan tasaisuuden ja epoksitiivistyksen tiiveyden mittaukset)*

Vaadittavat mittaukset (infraRYL, osa 3)	Diplomityössä tehdyt lisämittaukset
Eristysalustan tasaisuus	Eristysalustan tartuntavetolujuus
Eristysalustan makrokarheus	Eristysalustan absoluuttinen kosteus (20 mm)
Eristysalustan pintakosteuskartoitus	Eristysalustan absoluuttinen kosteus (50 mm)
Eristysalustan absoluuttinen kosteus (30 mm)	Eristysalustan suhteellinen kosteus (0 - 50 mm)
Epoksitiivistyksen tartuntavetolujuus	Eristysalustan ohuthietutkimus ja huokosanalyysi
Epoksitiivistyksen vesitiiveys matalajännitemenetelmällä	
Epoksitiivistyksen vesitiiveys korkeajännitemenetelmällä	

Uudissillakohteiden laadunvarmistuksesta on asetettu laatuvaatimuksia InfraRYL 2006 osa 3:ssa. Siltojen laadunvarmistus on jaettu yleisiin, urakan laatusuunnitelmaan, työvaihe-laatusuunnitelmaan sekä teknisen työsuunnitelman vaatimuksiin. Yleisissä laatuvaatimuksissa painotetaan laadukkaita ja yksityiskohtaisia suunnitelmia koskien rakenteita ja tuotantosuunnitelmia. Lisäksi vaaditaan jatkuvaa laadunohjausta, laaduntarkastuksia työvaiheittain sekä laaturaportointia. Suunnitelmissa tulee huomioida myös muissa asiakirjoissa esitetyt vaatimukset ja ohjeet sekä ottaa huomioon liikenteen, työturvallisuuden ja ympäristönsuojelun vaatimat toimenpiteet. Jos suunnitelmiin tulee muutoksia, tulee muutoksiin saada lupa ennen muutostöiden aloittamista. Töiden etenemistä tulee ohjata ja tarkkailla suunnitelma-asiakirjoissa kuvatulla tavalla. Tarkastuksista, laadunvarmistusmittauksista ja testauksista tulee laatia raportti tai pöytäkirja, jotka luovutetaan tilaajan edustajalle. Urakoitsijalla on velvollisuus säilyttää kaikki suunnitelmat ja raportit liitteineen vähintään takuutarkastukseen asti. [38]

InfraRYL 2006 osa 3:n kappale 42001.4 Sillat, laadunvarmistus on esitetty liitteessä 1. Kappaleessa esitetään sillan laadunvarmistuksessa vaadittavat suunnitelmat.

Laadunvarmistusmittausten suorittamisessa tarvittavat ohjeet ja menetelmäkuvaukset löytyvät Liikenneviraston ohjeesta 26/2015 Sillan vedeneristystyömaan laadunmittaus. Ohje on ladattavissa Liikenneviraston internet-sivuilta. [24]

#### 4.1 Tutkimuskohteet

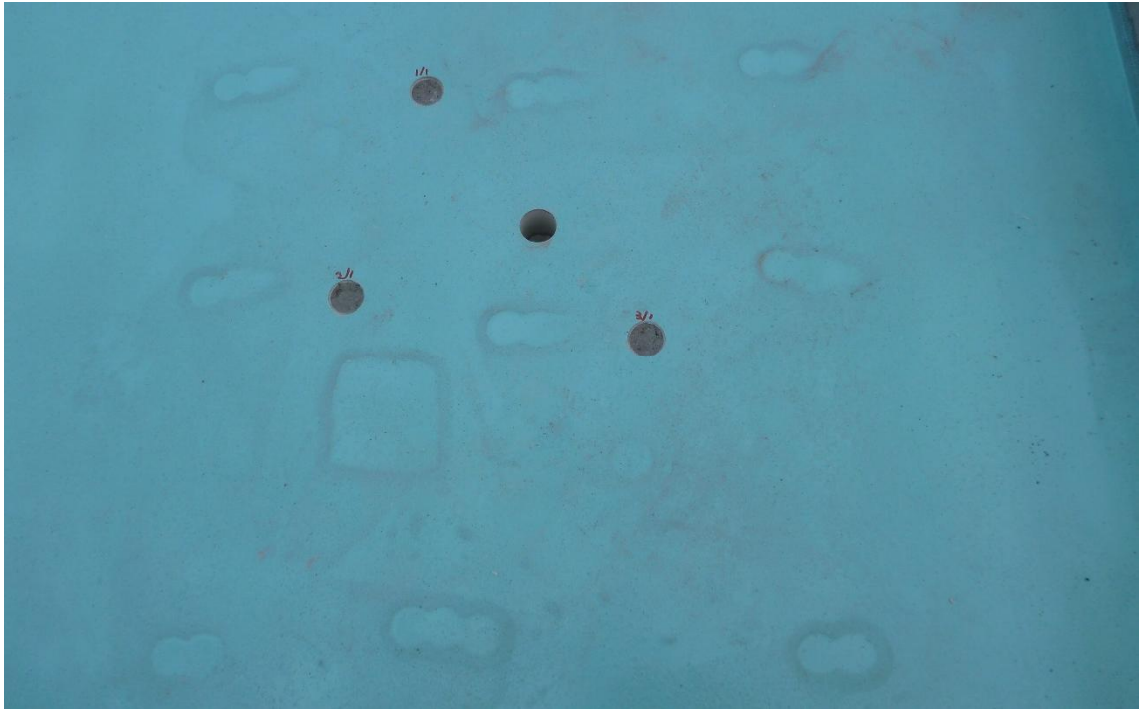
Tutkimuskohteiksi valittiin viisi uudissiltaa Etelä-Suomen alueelta. Silloista kolme sijaitsee pääkaupunkiseudulla ja kaksi Haminan seudulla. Mittaukset suoritettiin kesäkuun ja joulukuun välisenä aikana vuonna 2013. Betonikannen paksuudella ei pitäisi olla merkitystä suoritettujen kenttäkokeiden tuloksiin, koska betonin kosteus on suuruusluokaltaan lähellä 100 % noin kymmenen senttimetrin syvyydessä, kun kuivumisaika valusta on lyhyt ennen epoksointia. Ainoastaan silta 1 on kuivunut kauemmin, koska rakenne on valettu talvella ja pinnoitettu vasta kesällä.

Siltakansilta valittiin kolme yhden neliömetrin kokoista mittausaluetta. Mittausalueet valittiin Tramex-kosteudenilmaisimella niin, että Tramex:n lukema oli mahdollisimman korkea ja mittapistet kattaisivat mahdollisimman hyvin sillan eri alueet. Mittausalueeksi valittiin yksi neliömetri, koska näin pystyttiin absoluuttisen kosteuden mittaukset suoritamaan puolen metrin väleillä toisiinsa, kuten mittausohjeessa on ohjeistettu. Neliömetrin kokoiselle mittausalueelle suoritettiin yhteensä 16 mittaustoimenpidettä ennen epoksitiivistystä (kuva 25) ja neljä epoksitiivistyksen jälkeen (kuva 26).



*Kuva 25. Tyypillinen mittausalue ennen epoksitiivistystä suoritettujen mittausten jälkeen. Pyöreät vierekkäiset kuopat, joita on yhdeksän kappaletta puolen metrin väleillä, ovat absoluuttisen kosteuden mittaushaaroja. Neliön muotoinen kuoppa kuvassa on suhteellisen kosteuden näytepalamittauksessa tuleva kuoppa. Ympyrät, joissa on vaalea keskus, ovat betonipinnan tartuntavetoisuuden koestuskohtia (3+1 kappaletta, oikeanpuoleisin porausympyrä on mennyt vinoon, joten siitä ei ole otettu tartuntavetoisuuskoetta).*





*Kuva 26. Tyypillinen mittausalue epoksitiivistyksen jälkeisten kenttäkokeiden jälkeen. Kolme matalampaa pyöreää kuoppaa, jotka on numeroitu tussilla ovat epoksitiivistyksen tartuntavetolujuuden koestuskohtia. Yksi syvempi pyöreä kuoppa on kohta, josta on otettu näytelieriö ohuthietutkimuksia varten. Ennen epoksointia koestettut kohdat erottuvat selkeästi epoksitiivistystyön jälkeen, joten epoksitiivistyksen tartuntavetolujuuskokeet pystytään suorittamaan häiriintymättömään tiivistyskohtaan.*

### **Silta 1**

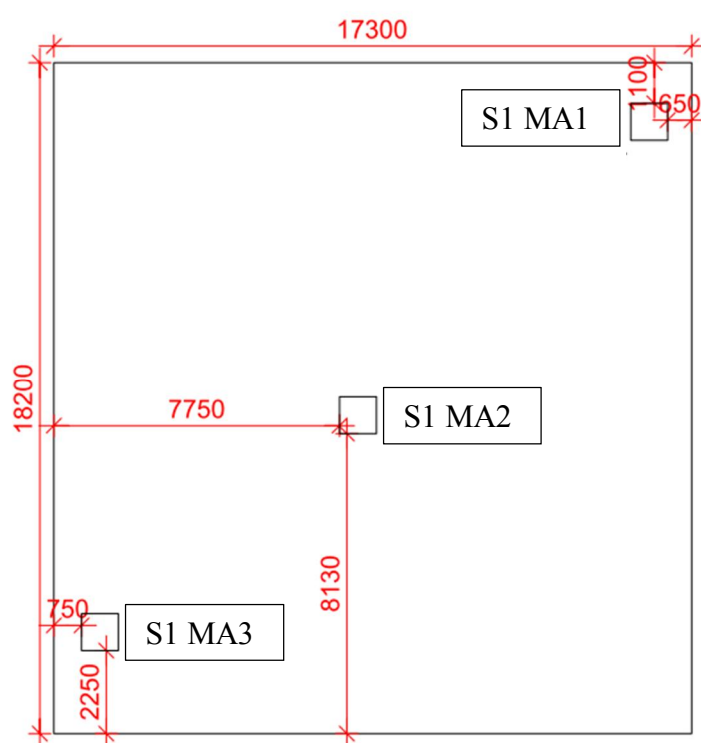
Kuvassa 27 on esitetty yleiskuva siltakannesta.



*Kuva 27. Sillan 1 siltakansi ennen epoksointia. Epoksoitava lohko rajautuu reunoissa liikuntasaumoihin sekä toisessa laidassa muuriin ja toisessa maatayttyöön. Kuvan takaosassa näkyvä lohko oli epoksoitu aikaisemmin.*

Ensimmäisenä tutkittu silta on rautatien päällä olevan asemarakenteen yksi liikunta-saumoihin rajautuva lohko. Tyypiltään asema on teräsbetoninen laattakehäsilta. Siltakoh-teiden vähäisyyden takia päädyttiin kenttäkokeet suorittamaan tässä kohteessa. Suurin ero tavanomaiseen siltaan verrattuna on, että pintarakenteet koostuvat hiekasta ja kiveyk-sestä. Rakenne kuitenkin eristettiin samoilla menetelmillä kuin tiesillat ja kohteessa oli käytössä samat raja-arvot epoksitiivistyksen levitykselle. Siltakannen lohkon päämitat ja mittausalueiden sijainnit on esitetty kuvassa 28.

Sillalla 1 ei ollut sääsuojaa epoksointi- tai kermieristystyön aikana. Siltakannelle satoi vettä epoksointia edeltävänä päivänä. Siltakannen pinta oli kuitenkin aistinvaraisesti tar-kasteltuna kuiva eikä tummia kosteampia alueita ollut havaittavissa ennen epoksoinnin aloitusta.



Kuva 28. Sillan 1 kannen päämitat ja mittausalueiden sijainnit esitetty neliöllä.

Kohde oli valettu talvella 2013 ja epoksitiivistys levitettiin kesällä 2013. Siltakansi oli ilman sääsuojaa koko ajan. Eli silta ei välttämättä ole kuivunut sen enempää kuin kesällä valettu silta, mutta betonin hydrataatio on edennyt pidemmälle. Sillalla ei ollut sääsuojaa, kuten kuvasta 27 on havaittavissa, myöskään epoksitiivistyksen aikana, jonka vuoksi tiivistystyötä jouduttiin siirtämään ensimmäisestä sovitusta päivästä. Vesisateen vaikutus on mahdollisesti havaittavissa suhteellisen kosteuden mittaustuloksissa viiden millimet-rin syvyydestä otettujen näytepalojen tuloksista.

## Silta 2

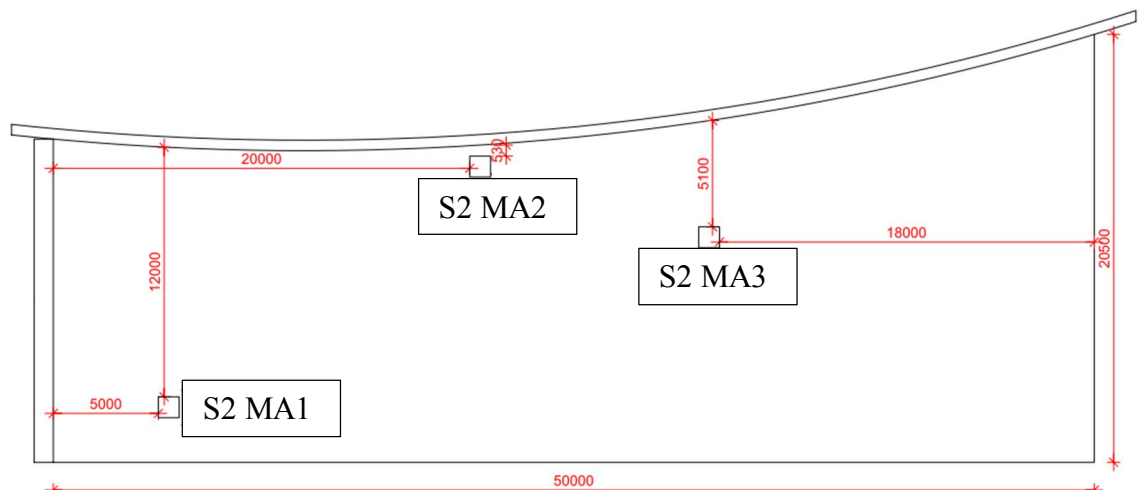
Kuvassa 29 on esitetty yleiskuva siltakannesta.



*Kuva 29. Sillan 2 siltakansi ennen epoksointia. Siltakannella oli ajettu pyöräkuormajalla tms. jonka renkaista oli jäänyt jälkiä betonipintaan. Toisen kaistan kermieristys on tuotu liian pitkälle epoksitiivistyksen päälle hyvän epoksitiivistyksen limityksen aikaansaamiseksi. Kuvassa näkyy myös kenttämittauskalusto siltakannella.*

Toisena epoksoitu silta oli moottoritien ylittävä silta, josta toinen kaista oli tehty aiemmin ja toinen kaista rakennettiin kesällä 2013. Betonikansi oli valettu noin 2 – 3 viikkoa ennen epoksointia. Kohteessa oli sääsuoja, mutta se ei ollut täysin tiivis, vaan päästi sadevettä esimerkiksi laidoista siltakannelle, koska kaikki sääsuojan laidat olivat auki. Lisäksi sääsuojassa oli yksittäisiä vuotokohtia siltakannen alueella. Myös tässä kohteessa epoksointia jouduttiin siirtämään vesisateiden takia. Sillan 2 kannen päämitat ja mittausalueiden sijainnit on esitetty kuvassa 30.

Sillalla 2 epoksointi- ja vedeneristystyöt suoritettiin sääsuojassa. Sääsuoja oli rakennettu tapahtumateltilta-/ talonrakennustyömaasääsuojista niin, että sääsuoja oli kaikilta laidoilta avoin. Epoksointia edeltävänä päivänä rankkasade kasteli epoksoitavan alueen laitoja. Siltakannen pinta oli kuitenkin aistinvaraisesti tarkasteltuna kuiva eikä tummia, muita alueita kosteampia, alueita ollut havaittavissa ennen epoksoinnin aloitusta.



*Kuva 30. Sillan 2 kannen päämitat ja mittausalueiden sijainnit esitetty neliöllä.*



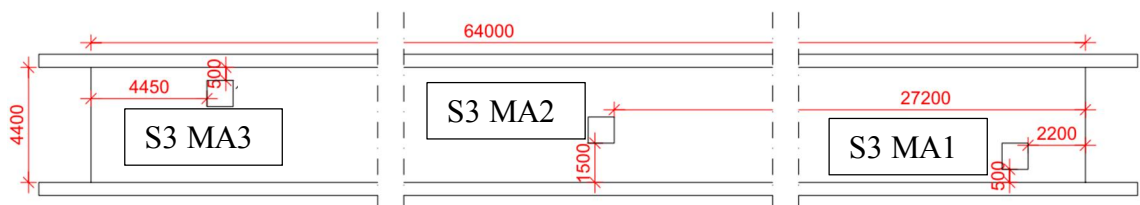
### Silta 3

Kuvassa 31 on esitetty yleiskuva siltakannesta.



*Kuva 31. Sillan 3 siltakansi ennen epoksointia. Sääsuoja oli varsin matala epoksitiivisyyksen levitystä ajatellen. Kuvassa näkyy diplomityön kentäkoelvarusteita.*

Kolmas siltakohde oli kohtalaisen kapea jännitetty betoninen jatkuva palkkisilta, joka ylitti moottoritien. Silta oli valettu 2 – 3 viikkoa ennen epoksointia ja kohteessa oli puusta ja muovista rakennettu sääsuoja kuivumisen ja epoksoinnin aikana. Sääsuojassa oli pieniä vuotokohtia, jotka eivät vaikuttaneet epoksointiin. Epoksointi suoritettiin alkusyksystä 2013. Ennen epoksointia tehtiin kohtalaisen laajat hiekkaepoksipaikkaukset sillan reunapalkkien sisäreunoihin. Sillan 3 kannen päämitat ja mittausalueiden sijainnit on esitetty kuvassa 32.



*Kuva 32. Sillan 3 kannen päämitat ja mittausalueiden sijainnit esitetty neliöllä.*

Sillalla 3 sääsuojassa oli paikan päällä puusta rakennettu kehikko ja vedeneristeenä toimi muovikalvo, joka oli jatkettu sääsuojan sivuille ja reunojen alalaitoihin oli asennettu painoja. Sääsuoja piti kohtalaisen hyvin vettä pieniä reikiä lukuun ottamatta.

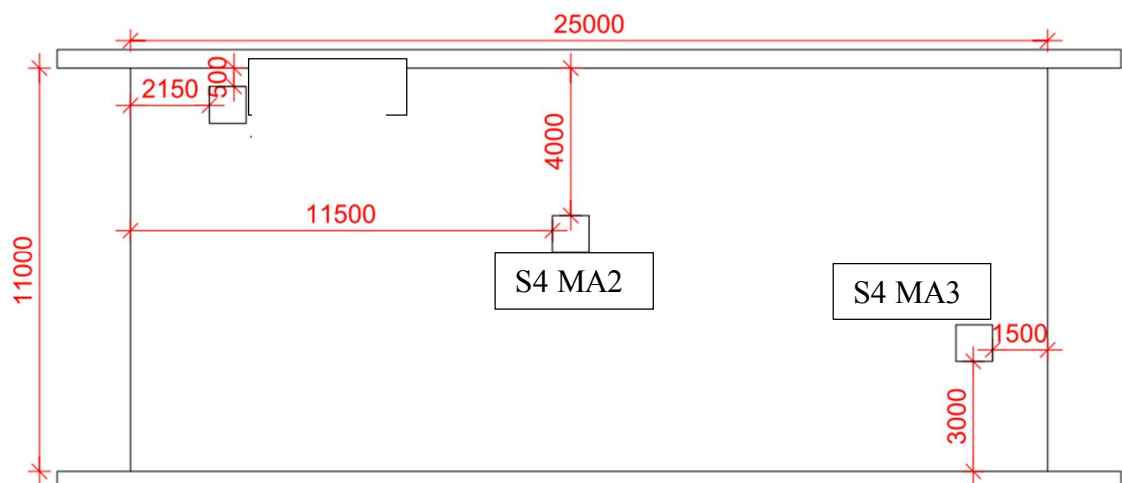
## Silta 4

Kuvassa 33 on esitetty yleiskuva siltakannesta.



*Kuva 33. Sillan 4 siltakansi ennen epoksointia. Kosteita alueita on havaittavissa kuvassa tummempina kohtina betonipinnassa. Kuvan etualalla näkyy päällystettävyyden arviointiin käytetty kosteusmittauskohta, joka on toteutettu sahaamalla.*

Neljäntenä tutkittu silta oli lyhyehkö moottoritien jännitetty betoninen ulokepalkkisilta. Epoksitiivistys suoritettiin alkusyksystä 2013. Kohteessa oli puusta rakennettu sääsuojan runko, jonka päälle oli asennettu muovikalvo sateen suojaksi ja sivuihin oli asennettu kevytpeitteet suojaamaan viistosateelta. Kevytpeitteet eivät kuitenkaan olleet kunnolla kiinnitetty alhaalta, vaan tuuli oli riepottellut peitteet irti ja osa siltakannesta oli kastunut sateen ja valumavesien vaikutuksesta. Urakoitsija ilmeisesti kuivatti kastuneet alueet ennen epoksointia. Mittaukset suoritettiin kastuneiden alueiden ulkopuolelta. Mittausalue kolme on kastuneen alueen rajalla. Mittausalueiden sijainti siltakannella ja siltakannen päämitat on esitetty kuvassa 34.



*Kuva 34. Sillan 4 kannen päämitat ja mittausalueiden sijainnit esitetty neliöllä.*

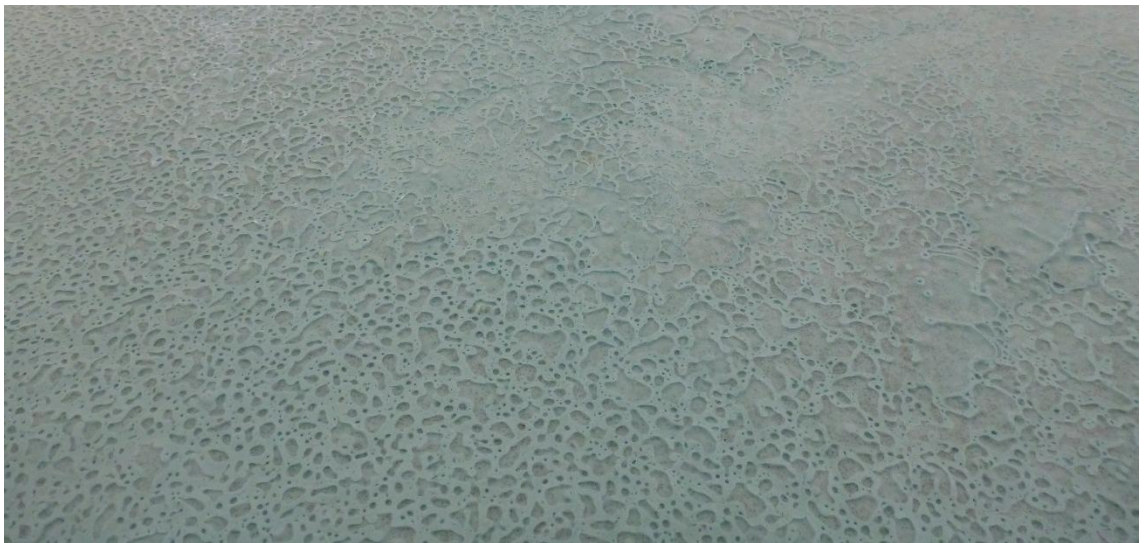
## Silta 5

Kuvassa 35 on esitetty yleiskuva siltakannesta.



*Kuva 35. Sillan 5 siltakansi ennen epoksointia. Sääsuojan sisempi peite oli asennettu vaakatasoon.*

Viimeinen tutkittu siltakansi oli rautatien ylittävä risteyssilta. Sillan sääsuojana oli talonrakennustyömaillakin käytössä oleva sääsuojarakenne, jossa oli kiskoihin asennetut presut ja niiden alla kevytpeite keräämässä mahdollisia vuotovesiä ja eristämässä työskentelytilaa kylmältä ilmalta. Ennen epoksointia satoi reilusti kosteaa lunta, joka kerääntyi suojakatoksen päälle ja sulii, niin että kevytpeitekerroksen päälle kerääntyi vettä pusseille. Osa näistä vesipusseista vuoti epoksoitavalle alueelle ja vahingoitti epoksia ennen kovettumista (kuva 36). Nämä alueet korjattiin paikkausepoksoinnin yhteydessä. Siltakannen kuivuminen kesti kohtalaisen kauan, koska ulkolämpötila oli pakkasella ja suojatelttaa lämmitettiin öljylämmittimillä. Lisäksi suojateltassa oli muutama kosteudenkerääjä.



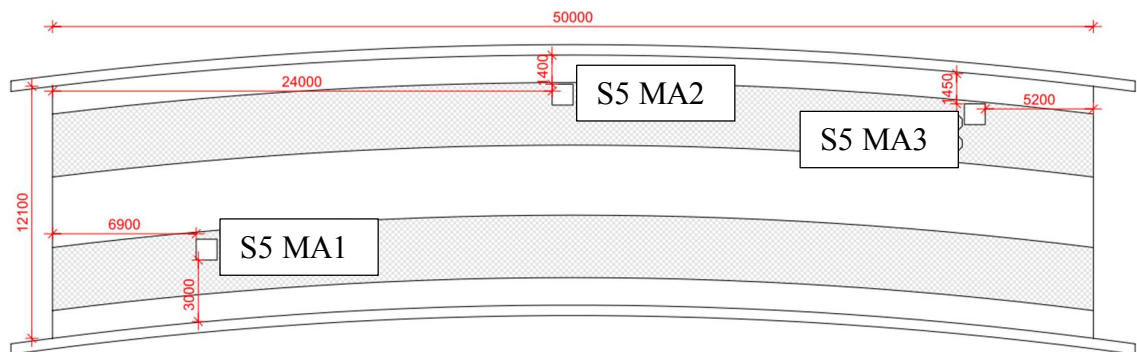
*Kuva 36. Sääsuojan vuotama vesi aiheutti epoksitiivistykseen koloja. Vaurioituneet alueet tiivistettiin uudestaan paikkausten yhteydessä.*



Epoksointi suoritettiin joulukuun alussa 2013. Sillalla 5 epoksitiivistys levitettiin vain kantavien palkkien alueelle kolmen metrin leveydelle. Epoksitiivistyskaistojen ja reuna-palkkien väliin jäi noin 1,32 metrin alueet ilman epoksia ja epoksitiivistyskaistojen väliin noin 3,3 metrin alue ilman epoksitiivistystä (kuva 37). Menetelmä, jossa vain kantavien palkkien alueet epoksoidaan, on vanha ja ratkaisu perustuu siihen, että kantavien palkkien kohdalla on paksumpi betonirakenne ja näin myös enemmän kosteutta ja suurempi kosteudesta aiheutuva paine [53]. Epoksitiivistetyt alueet, mittausalueiden sijainnit ja sillan päämitat on esitetty kuvassa 38.



*Kuva 37. Epoksitiivistyksen ensimmäinen kerros. Kuvassa on havaittavissa epoksitiivistyksen ensimmäisen kerroksen päälle levitettyä kvartsihiekkaa. Sillalla 5 epoksitiivistys levitettiin vain kantavien palkkien alueelle kolmen metrin levyisinä kaistoina. Kuvan keskellä on havaittavissa sääsuojan lämmittämiseen käytetty öljylämmitin ja öljysäiliö.*



*Kuva 38. Sillan 5 kannen päämitat ja mittausalueiden sijainnit esitetty neliöllä. Kuvaan on harmaalla merkattu epoksitiivistetyt alueet.*

## 4.2 Kenttäkokeiden tutkimusmenetelmät

Kenttäkokeissa suoritettujen mittausten tutkimusmenetelmät perustuvat Liikenneviraston käyttämiin InfraRYL 2006 osa 3:ssa Sillat ja rakennustekniset osat esitettyihin laadunvarmistus vaatimuksiin. Laadunvarmistusmittausten lisäksi kenttäkokeissa suoritettiin betonipinnan tartuntavetolujuuden koestus, laajemmat absoluuttisen kosteuden mittaukset kaikilta Suomessa käytössä olleilta mittaussyvyyksiltä sekä ohuthieanalyysi siltakan-  
nen betonista.

### 4.2.1 Makrokarheus

Betonisen siltakan-  
nen makrokarheudella tarkoitetaan eristysalustan pinnan pienimuotoista epätasaisuutta. Makrokarheuden aallonpituus on 0,5 millimetristä 50 millimetriin. [16] Betonipinnan karheusvaatimukseksi (makrokarheus) InfraRYL osa 3:ssa ennen epoksitiivistystä ja eristämistä on asetettu 0,3 – 1,2 mm. [38]

Pinnan makrokarheus mitataan lasihelmimenetelmällä (SFS-EN 13036-1) jokaista alkavaa 500 m<sup>2</sup> kohden kolmesta kohdasta siltakan-  
nta. Lasihelmimenetelmässä levitetään yleensä 25 ml standardikokoisia lasihelmiä pyöreällä kiekolla ympyräliikkein siltakan-  
nelle. Kun lasihelmet on levitetty, mitataan lasihelmiä sisältävän alueen halkaisija neljästä kohdasta. [47] Menetelmän tarkempi kuvaus on esitetty lähteessä 24.

1,2 mm karheampi betonipinta pitää joko hioa tasaisemmaksi tai käyttää hiekaepoksia epätasaisuuksien tasoittamiseen. Yleensä epätasaisuuksien tai liian karhean pinnan tasoittamiseen ei käytetä betonipohjaisia tasoitteita niiden vaatiman kuivumisajan takia. Pinnan ollessa liian sileä (makrokarheus < 0,3 mm) pitää betonipinta käsitellä hieka- tai sinko-  
puhalluksella. [38]

### 4.2.2 Betonin tartuntavetolujuus

InfraRYL 2006 osa 3:ssa ei ole määritelty vaatimusta siltakan-  
nen betonin tartuntavetolujuudelle uudiskohteissa. Tämä johtuu siitä, että nykyisillä menetelmillä toteutetun betonisen siltakan-  
nen pinnan tartuntavetolujuuden uskotaan täyttävän 1,5 MPa:n tartuntavetolujuusarvon sementtiliiman poiston jälkeen. [53]

Betonirakenteiden korjausohjeissa BY41:ssä on betonin tartuntavetolujuusarvoksi määritelty 1,5 MPa. Arvo on käytössä esimerkiksi pihakansilla ennen vedeneristyskermin asennusta. [45]

Betonipinnan tartuntavetolujuus koestettiin standardin SFS 5446 mukaan. Koestuksessa betonipintaan rajataan koestettava pyöreä alue, mikä tehdään porakoneella käyttäen timanttikruunuterää. Porausuran syvyys on noin 10 – 20 mm pinnan tartuntavetolujuutta koestettaessa. Rajauksen jälkeen kohta puhdistetaan teräsharjalla ja asetonilla. Puhdistuksen jälkeen vetokoesylinteri liimataan betonipintaan. Liimauksessa käytettiin Loctite 454 –pikaliimaa ja kiihdytintä. Liiman kovetuttua tartuntavetolaite kiinnitetään vetosylinteriin ja tartuntavetolujuuskoe suoritetaan. Vetonopeutena betonipintoja koestettaessa käytetään 98 N/s. Käytetty F 20 D-Easy M tartuntavetolaite näyttää tartuntavetolujuustuloksen muodossa N/mm<sup>2</sup>. Jos tartuntavetolaite antaa tulokseksi voiman kilonewtoneina [kN], jossa murto on tapahtunut, voidaan se muuttaa megapascaliksi [MPa] tai Newtonia per neliömillimetri [N/mm<sup>2</sup>] kaavalla 2. [46]

Kaava tartuntavetolujuustuloksen muuntamiseen muodosta kN muotoon N/mm<sup>2</sup>.

$$f = \frac{1000F}{A}, \quad (2)$$

missä  $f$  = tartuntavetolujuus;  $F$  = tartuntavetolujuus [kN] ja  $A$  = koestettavan alueen pinta-ala. [46]

### 4.2.3 Kosteusmittaukset

#### Absoluuttisen kosteuden mittaus

Betonisen siltakannen eristyspinnan kosteus mitataan absoluuttisena kosteutena (m-%) kuivatus-punnitusmenetelmällä VTT-2650 – 2013 ohjeen mukaan. Liikenneviraston ohjeiden mukaan kosteus mitataan, jos sillan pinta-ala on yli 100 m<sup>2</sup> sekä siltakannen rakenepaksuus on vähintään 400 mm. Jos siltakansi on alle näiden mittojen, tulee betonipinnan kuivua vähintään kolme viikkoa ennen eristystöiden aloitusta. Kuivumisaika laskeaan jälkihoidon päättymisestä. [38]

Kuivatus-punnitusmenetelmässä siltakannesta irrotetaan betoninen näytekappale. Näytekappaletta kuivataan 105 °C lämpötilassa, kunnes sen paino ei enää 0,1 g tarkkuudella muutu. Veden haihtumista tarkkaillaan punnitsemalla näyte kerran vuorokaudessa. Painonmuutoksesta lasketaan alkuperäisen näytteen sisältämä absoluuttinen kosteus seuraavalla kaavalla

$$\text{Kosteus (m - \%)} = ((m1 - m2) \div m2) \cdot 100, \quad (3)$$

missä  $m1$  = näytteen massa ennen kuivatusta ja  $m2$  = näytteen massa kuivauksen jälkeen. [50]

InfraRYL 2006 osa 3:n mukaan absoluuttisen kosteuden mittausnäytepaloja tulee ottaa aina vähintään kolmesta kohdasta eristysalustan kosteuden määrittämistä varten. Jos siltakannen pinta-ala on yli 500 m<sup>2</sup>, lisätään yksi mittauskohta jokaista alkavaa 500 m<sup>2</sup> kohden. Yhdestä kosteusmittauskohdasta otetaan kolme näytettä. Näytteet otetaan samalta etäisyydeltä reunapalkista noin 50 cm päästä toisistaan. Näytekappaleet voi irrottaa esimerkiksi 50 mm timanttikruunuporalla ja lyöntikiilalla. Näytekappaleen paino ennen kuivatusta tulee olla noin 150 grammaa. Vuonna 2013 näytteenotto-syvyydeksi määrättiin 30 mm. Aiemmin käytettyjä syvyyksiä ovat olleet 20 mm ja 50 mm. [38]

InfraRYL 2006 osa 3:ssa on asetettu betonikannen suurimmaksi sallituksi kosteudeksi ennen epoksointia 5,0 m-% ellei tilaaja ole erikseen hyväksynyt, että epoksointi voidaan toteuttaa kosteammalle alustalle. Ennen epoksoinnin aloitusta betonipinnassa ei saa olla havaittavissa kosteudesta johtuvia tummempia alueita. [38]

Tarkempi menetelmä kuvaus on esitetty lähteessä 24.

#### Suhteellisen kosteuden mittaus

Diplomityön kenttäkokeissa tehtiin myös Liikenneviraston ohjeistamien laadunvarmistusmittausten lisäksi betonin suhteellisen kosteuden mittauksia näytepalamenetelmällä. Mittauksia suoritettiin yksi jokaisesta tutkimusalueesta (3 kpl / silta). Rakennuksissa betonin kosteus mitataan lähes poikkeuksetta suhteellisena kosteutena. Siltakansien sallitulle betonin suhteelliselle kosteudelle ennen epoksitiivistystä ei ole olemassa voimassa

olevaa raja-arvoa. Mittaukset suoritettiin absoluuttisen ja suhteellisen kosteuden tulosten vertailemiseksi.

Näytepalamittauksessa irrotetaan piikkaamalla betonista paloja tai muruja, jotka laitetaan näyteputkeen mittapään kanssa. Näytepalamittauksen tulokset saadaan viimeistään seuraavana päivänä ja tarvittaessa nopeamminkin. Menetelmää voidaan käyttää  $-20 - +80$  °C lämpötiloissa. Mittausta voidaan käyttää myös tilanteissa, joissa olosuhteet vaihtelevat. Mittausolosuhteiden ja mitattavan rakenteen lämpötila eivät vaikuta mittaustulosten luotettavuuteen. [37]

Näytepalamittaus aloitetaan yleensä ottamalla näytepalat betonin pinnasta, jonka jälkeen piikataan betoniin tasainen pinta viisi millimetriä halutun mittaussyvyyden yläpuolelle. Kun syvyys on saavutettu, irrotetaan piikkaamalla muruja betonista haluttuun mittaussyvyyteen asti. Näyte koostuu betonimuruista, jotka on otettu mittaussyvydeltä ja siitä viisi millimetriä ylöspäin. Irrotettavien murusten tulee olla mahdollisimman suuria kuitenkin niin, että ne mahtuvat näytepalaputkeen eikä betonia ole tullut mittaussyvyttä syvemmältä. Murusista irrotetaan suuret runkoainekappaleet ja murut laitetaan kahteen koeputkeen. Koeputkeen ei saa laittaa pieniä muruja tai pölyä, koska ne vääristävät tulosta. Koeputken tilavuudesta täytetään noin kolmannes, että betonimurusten huokosissa oleva suhteellinen kosteus varmasti tasaantuu koeputken ilmatilaan. Näytteenoton jälkeen putkiin asennetaan suhteellisen kosteuden mittapää ja putken suu tiivistetään vesihöyrytiivillä kitillä. Tiivistämisen jälkeen näyteputket viedään vakioilämpötilaan tasaantumaan. Yleensä tasaantuminen toteutetaan noin 20 °C lämpötilassa. Tasaantuminen kestää 5 – 12 tuntia mittapäästä ja betonilaadusta (lujemmilla betoneilla tasaantuminen kestää pidempään) riippuen. Tasaantumisen jälkeen lukulaitteesta kirjataan lukemat. Saatu tulos kertoo betoninäytteen suhteellisen kosteuden tasaantumislämpötilassa. [37] Tarkempi menetelmäkuvaus on esitetty lähteessä 37.

Mittaussyvyyksiksi kenttäkokeissa päätettiin 0 – 5 mm, 5 – 10 mm, 15 – 20 mm, 25 – 30 mm, 45 – 50 mm, jotta saatiin absoluuttisen kosteuden käytössä olleilta mittaussyvyyksiltä mahdollisimman tarkka kosteusjakaumatieto. Syvyydet valittiin edustamaan betonin pinnan suhteellista kosteutta (0 – 10 mm) sekä vuosien mittaan absoluuttisen kosteuden mittauksissa käytettyjä syvyyksiä (20 mm, 30 mm ja 50 mm).

#### **4.2.4 Epoksitiivistyksen tartuntavetolujuus**

Epoksitiivistyksen tartunta siltakanteen koestetaan tartuntavetolujuuslaitteella (menetelmä SFS-EN 1542). Tartuntavetolujuus testataan yleensä kolmesta kohdasta siltakannta. Epoksitiivistyksen ja alustan välinen tartuntavetolujuus tulee olla vähintään 1,0 N/mm<sup>2</sup> kaikissa kohdissa siltakannta. Lisäksi tartuntavetolujuuskokeiden tulosten keskiarvon pitää olla vähintään 1,5 N/mm<sup>2</sup>. Tarkempi menetelmä kuvaus on esitetty lähteessä 24. Vaatimukset alittavat tartuntavetolujuuskokeiden tulokset ovat yleensä merkki huonosta sementtiliiman, jälkihoitoaineen tai pölyn poistosta. InfraRYL 2006 osa 3:ssa on ohjeistettu, että epoksitiivistyksen pinta on puhdistettava huolellisesti ennen vedeneristysten asennusta. Suojaamattoman epoksitiivistyksen päällä ei saa liikkua ja epoksitiivistys on eristettävä vähintään viikon kuluessa sen valmistumisesta. [38]

#### **4.2.5 Epoksitiivistyksen tiiveyden mittaus matala- ja korkeajännitemenetelmällä**

Epoksitiivistyksen vesitiiveyttä voidaan tutkia joko matala- tai korkeajännitemenetelmällä. Molemmissa menetelmissä mitataan epoksin sähköneristyskykyä. Menetelmissä

määritetään epoksitiivistyksen vesitiiviys epoksoinnin betonin pinnalle muodostaman sähkövastuksen (eristysvastuksen) perusteella. Pääjohteenä molemmissa menetelmissä toimii sillan betonialusta. Menetelmillä saadaan selville, jos epoksitiivistyksen kerrospaksuus on liian ohut, tiivistys on huokoinen tai epoksissa on halkeamia tai pieniä reikiä, joita ei aistinvaraisesti pysty havaitsemaan. [24] Matala- ja korkeaajännitemenetelmien kuvaukset on esitetty lähteessä 24.

#### 4.2.6 Ohuthietutkimus

Varsinaisten laadunvarmistusmittausten lisäksi diplomityössä tehtiin ohuthietutkimuksia siltakansien kovettuneesta betonista. Ohuthietutkimuksilla selvitettiin siltakansien kovettuneen betonin ilmamäärä sekä huokosjako. Urakoitsijoilta tai betonivalmistajilta ei saatu suhteitus- ja ilmamäärätietoja kaikista silloista, mutta eräs silloille betonia valmistanut yritys ilmoitti heidän suhteittavan siltakansien betonin niin, että ilmamäärä on välillä 4,5 – 6 %.

Ohuthieanalyysissä käytettiin VTT TES R003-00-2010 –menetelmää, jota voidaan soveltaa lisähuokostetun kovettuneen betonin ilmahuokosparametrien määrittämiseen silmämääräisesti ohuthieistä mikroskooppia, näytteensiirtopöytää ja laskuria käyttäen. Ilmahuokosparametrejä tässä menetelmässä ovat:

- betonin kokonaisilmamäärä,
- betonin suojahuokosten ilmamäärä,
- betonin tiivistyshuokosten ilmamäärä,
- betonin suojahuokosten ominaispinta-ala,
- suojahuokosten huokosjako. [52]

Jokaisesta sillasta porattiin kolme betonilieriötä ohuthieiden valmistusta varten. Betonilieriöt porattiin mittapisteiden alueelta kohdista, joissa näkyi huokosia epoksissa tai muuta tavallisesta poikkeavaa. Lieriöistä valmistettiin pääasiassa yksi ohuthie, niin että epoksitiivistys oli ohuthieen laidassa. Yhdestä lieriöstä valmistettiin kaksi perättäistä hiettä, että saataisiin selville, muuttuuko betonin koostumus noin 100 mm syvyydessä pintaan verrattuna. Ohuthieet valmistettiin standardeissa NT BUILD 381 ja ASTM C 856 esitettyjen preparointimenetelmien mukaan. Ennen preparointia tiivistysepoksi suojattiin epoksihartsilla, ettei epoksitiivistys irtoa preparoinnin yhteydessä. Epoksihartsikäsittelyn jälkeen betonilieriö leikattiin kahtia pituussuunnassa ja merkittiin alue, jolta ohuthie valmistetaan. Betoninäytepalat impregnoitiin tyhjiössä fluoresoivaa väriainetta sisältävällä epoksihartsilla. Impregnoitu näyte liimattiin objektilasille ja ohennettiin timanttisahausta ja -hiontaa käyttämällä noin 0,025 mm paksuuteen. Lopuksi hieen päälle liimattiin peite-lasi. Osa ohuthieistä valmistettiin Texasissa, jotta saatiin pinta-alaltaan suurempi (~ 50mm · 75 mm) ohuthienäyte ja osa Suomessa, jolloin ohuthieen koko oli noin 30 mm · 50 mm.

Analyysi tehdään optisella polarisaatiomikroskoopilla, näytteensiirtolaitteella ja siihen kytketyllä pistelaskurilla soveltaen muunnettua pistelaskentamenetelmää. Menetelmässä sovelletaan muunnettua pistelaskentamenetelmää, joka on esitetty standardeissa NT BUILD 381 ja ASTM C 457. Menetelmässä lasketaan analyysipisteen pysähdyspaikat sekä analyysiviivan leikkaamien huokosten lukumäärä. Pysähdyspaikkoja voivat olla ki-viaines, sementtipasta tai huokonen. Huokokset jaetaan kokoluokan mukaan tiivistys- tai



suojahuokosiin. Näiden saatujen arvojen avulla voidaan laskea betonin kokonaisil-mamäärä, suojahuokosten määrä ja ominaispinta-ala sekä huokosjako. Huokosjaon las-kemiseen käytetään Powers'in kaavaa. [52]

Analyysissä tulee olla vähintään 1500 kappaletta analyysipisteitä (välimatka 1 mm) ja analyysiviivanpituus tulee olla yhteensä vähintään 2300 mm. Analyysiin otetaan mukaan huokokset, joiden lävistyspituus on vähintään 0,020 mm. Huokokset jaetaan niiden koon mukaan 0,020 – 0,800 mm ja > 0,800 mm kokoisiin huokosiin. Jaottelu tehdään sekä analyysipisteiden pysähdyspaikkojen että lävistysten perusteella. [52]

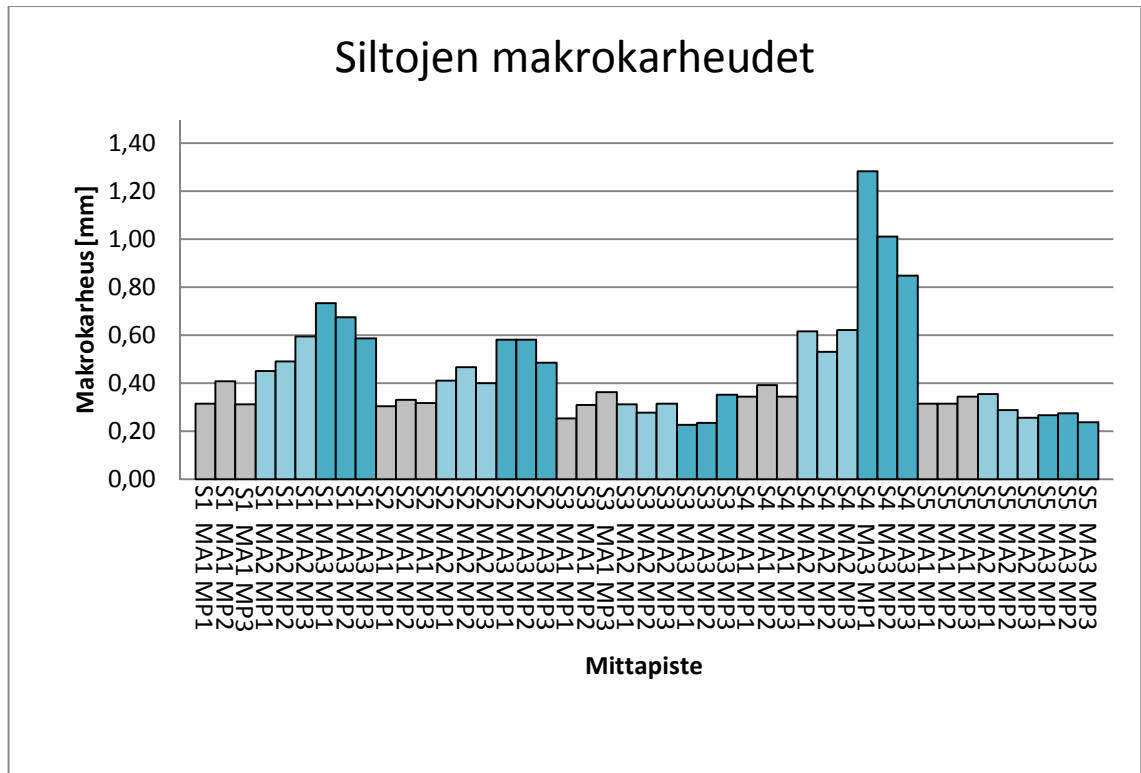
Analyysissä lasketaan huokosten kokonaismäärä betonissa ( $A_{at}$ , [%]), suojahuokosten määrä betonissa ( $A$ , [%]), tiivistyshuokosten ilmamäärä ( $A_t$ , [%]), ominaispinta-ala ( $\alpha$ , [ $\text{mm}^2 / \text{mm}^3$ ]) ja huokosjako ( $L$ , [mm]). Ominaispinta-ala ja huokosjako lasketaan perus-tuen suojahuokosiin.

Analyysistä saatavat tulokset betonin suojahuokosten, tiivistyshuokosten ja kokonaisil-mamäärästä ilmoitetaan 0,1 % tarkkuudella. Suojahuokosten ominaispinta-ala ilmoite-taan  $1 \text{ mm}^2/\text{mm}^3$  tarkkuudella ja suojahuokosten huokosjako 0,01 mm tarkkuudella. Suo-jahuokosten huokosjako ilmoitetaan muodossa > 0,40 mm, jos tämä arvo ylittyy. Sement-tipastan määrä voidaan ilmoittaa yhden prosentin tarkkuudella, jos tiedolle on tarvetta. [52]

### **4.3 Tulokset kenttäkokeista**

#### **4.3.1 Makrokarheus**

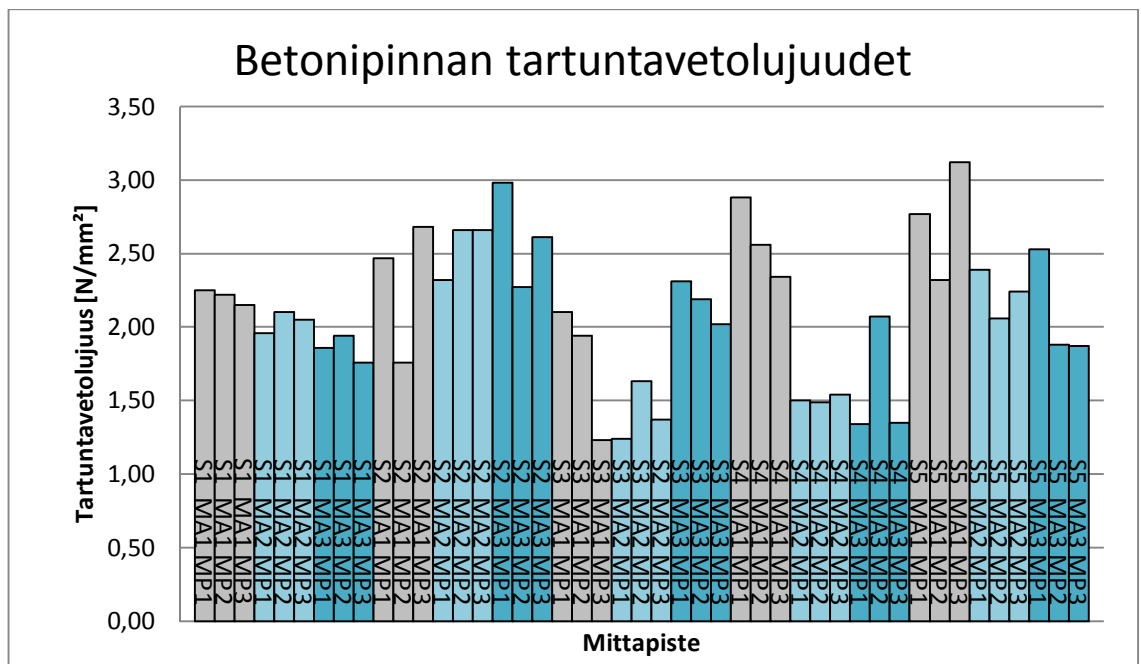
Makrokarheuksien mittaustulokset vaihtelivat 0,23 mm ja 1,28 mm välillä. Pääasiassa yhdeltä sillalta saadut tulokset olivat samaa suuruusluokkaa. Silloilla 3 ja 5 karheustulos-ten vaihtelun suuruusluokka oli 0,2 mm. Sillalla 2 vaihtelun suuruusluokka oli 0,3 mm ja sillalla 1 0,4 mm. Sillalla 4 mitta-alueiden välinen karheuden vaihtelu oli suuruusluokal-taan 1,0 mm. Karheuden vaihtelu oli aistinvaraisesti tarkasteltuna havaittavissa. Mitta-alueiden sisäiset vaihtelut olivat pääasiassa 0,1 mm suuruusluokkaa. Ainoastaan sillan 4 mitta-alueella 3 karheus vaihteli välillä 0,85 – 1,28 mm eli noin 0,4 mm. Siltakansien makrokarheuden mittaustulokset ovat esitetty kuvassa 39.



Kuva 39. Makrokarheuden mittaustulokset [mm].

#### 4.3.2 Betonin tartuntavetolujuus

Kenttäkokeissa suoritettujen betonipinnan tartuntavetolujuuskokeiden tulokset ennen epoksointia on esitetty kuvassa 40. Tulokset vaihtelivat  $1,23 \text{ N/mm}^2$  ja  $2,98 \text{ N/mm}^2$  välillä. Pienimmät ja suurimmat siltakohtaiset erot olivat  $0,49 \text{ N/mm}^2$  ja  $1,54 \text{ N/mm}^2$ . Mittausalueen sisäiset tulosvaihtelut olivat  $0,05 \text{ N/mm}^2$ :stä  $0,92 \text{ N/mm}^2$ :iin.



Kuva 40. Betonipinnan tartuntavetolujuuskokeiden tulokset [ $\text{N/mm}^2$ ].

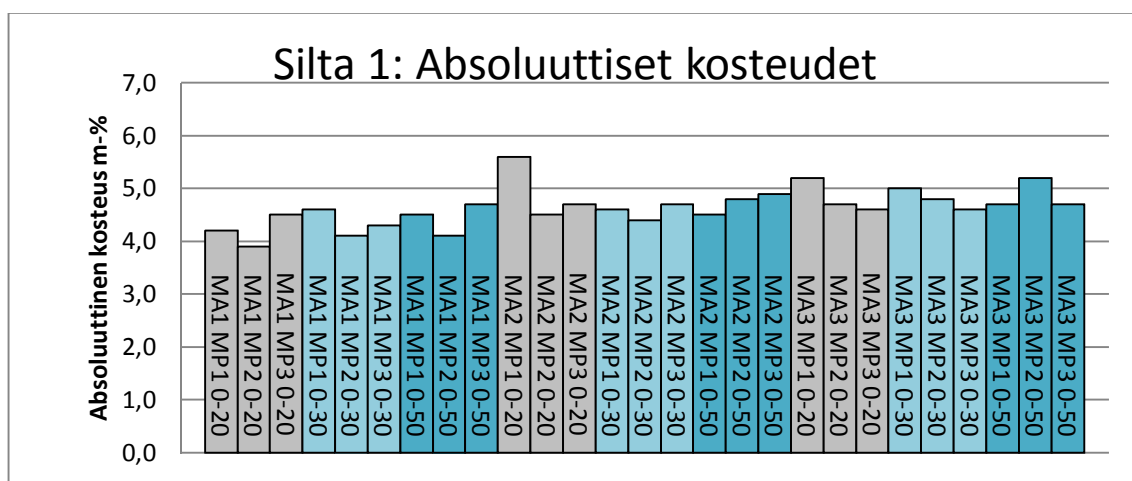
### 4.3.3 Kosteusmittaukset

#### Absoluuttinen kosteus

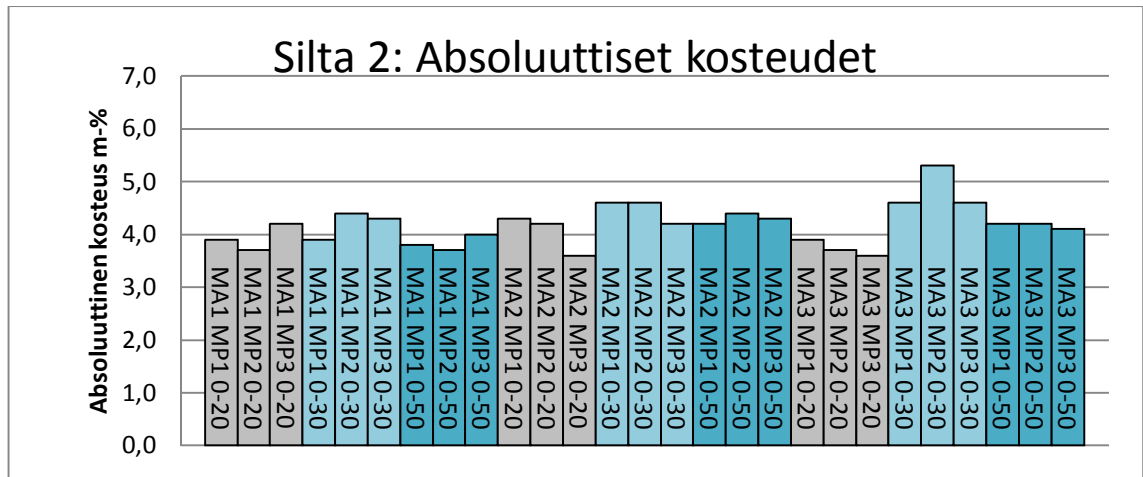
Absoluuttisen kosteuden mittaustulokset vaihtelivat 3,0 m-% ja 6,2 m-% välillä. Siltakohtaiset erot tuloksissa olivat 1,5 m-% tai 1,7 m-% ja mittausalueiden sisäiset erot vaihtelivat 0,1 m-%:sta 1,7 m-%:iin.

Silloilta 20 mm syvyydelle otetut absoluuttisen kosteuden mittaustulokset vaihtelivat 3,0 m-%:n ja 5,9 m-%:n välillä. 30 mm syvyydeltä otettujen mittausten tulokset vaihtelivat 3,4 m-%:n ja 6,2 m-%:n välillä ja 50 mm syvyydeltä otetut 3,5 m-%:n ja 6,0 m-%:n välillä. Siltakohtaiset vaihtelut absoluuttisen kosteuden mittaustuloksissa 20 mm syvyydeltä olivat sillalla 1: 4,6 – 5,4 m-%, sillalla 2: 3,6 – 4,2 m-%, sillalla 3: 3,0 – 4,5 m-%, sillalla 4: 4,4 – 5,9 m-% ja sillalla 5: 3,6 – 5,8 m-%. 30 mm syvyydeltä siltakohtaiset vaihtelut absoluuttisen kosteuden mittaustuloksissa olivat sillalla 1: 4,1 – 5,0 m-%, sillalla 2: 3,9 – 5,3 m-%, sillalla 3: 3,4 – 4,3 m-%, sillalla 4: 4,2 – 5,6 m-% ja sillalla 5: 3,9 – 6,2 m-%. 50 mm syvyydeltä otetut absoluuttisen kosteuden näytepalamittaustulokset vaihtelivat sillalla 1: 4,1 – 5,2 m-%:n välillä, sillalla 2: 3,7 – 4,4 m-%:n välillä, sillalla 3: 3,5 – 4,5 m-%:n välillä, sillalla 4: 4,5 – 5,6 m-%:n välillä ja sillalla 5: 4,1 – 6,0 m-%:n välillä.

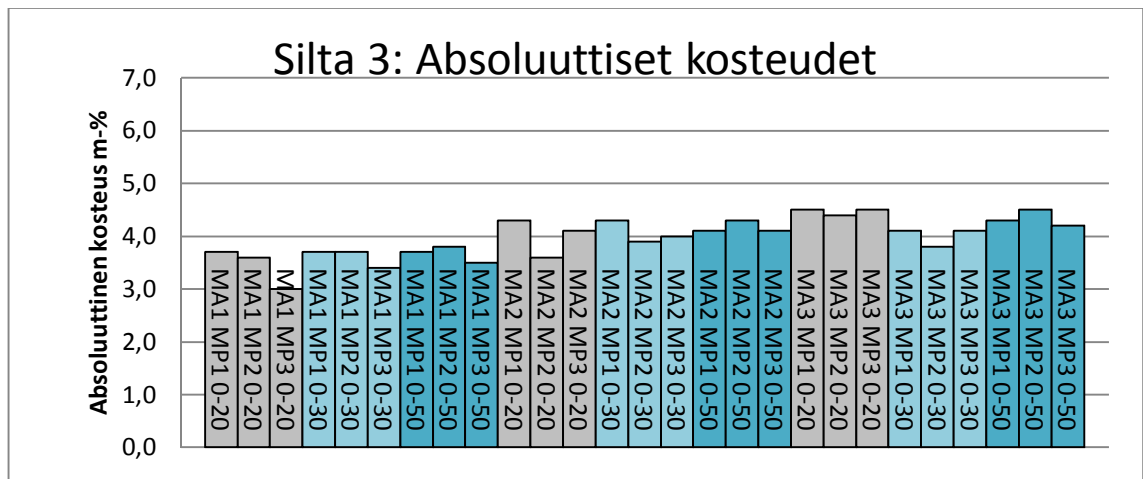
Siltojen absoluuttisen kosteuden mittaustulokset on esitetty kuvissa 41 – 45.



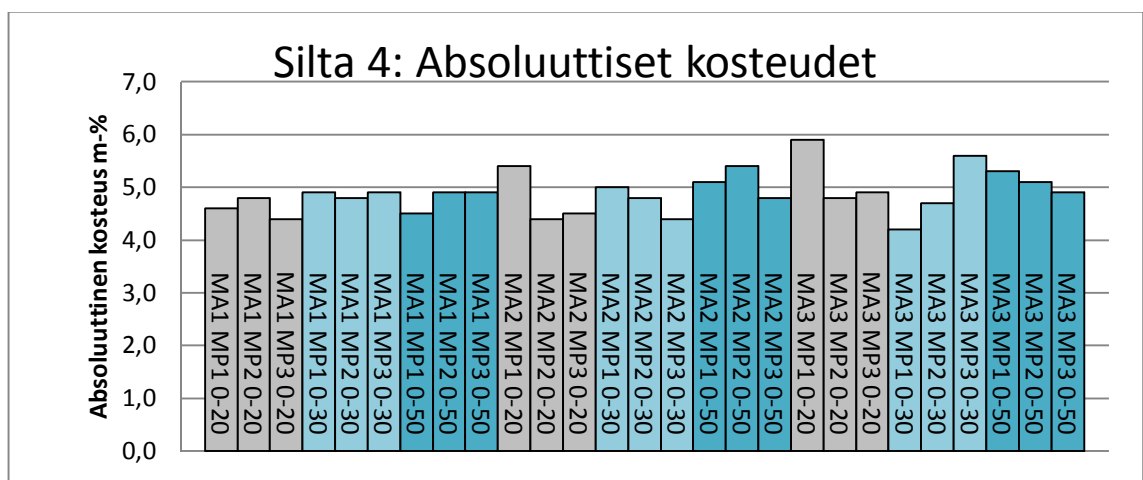
Kuva 41. Sillan 1 absoluuttisen kosteuden mittaustulokset kuivatus-punnitusmenetelmällä syvyyksiltä 0 – 20 mm, 0 – 30 mm ja 0– 50 mm.[m-%].



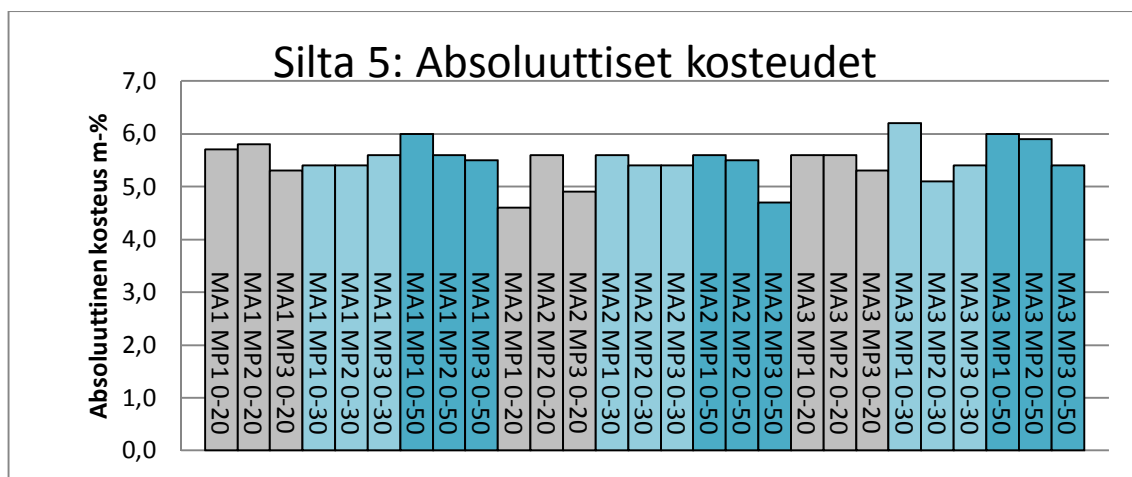
Kuva 42. Sillan 2 absoluuttisen kosteuden mittaustulokset kuivatus-punnitusmenetelmällä syvyyksiltä 0 – 20 mm, 0 – 30 mm ja 0- 50 mm [m-%].



Kuva 43. Sillan 3 absoluuttisen kosteuden mittaustulokset kuivatus-punnitusmenetelmällä syvyyksiltä 0 – 20 mm, 0 – 30 mm ja 0- 50 mm [m-%].



Kuva 44. Sillan 4 absoluuttisen kosteuden mittaustulokset kuivatus-punnitusmenetelmällä syvyyksiltä 0 – 20 mm, 0 – 30 mm ja 0- 50 mm [m-%].

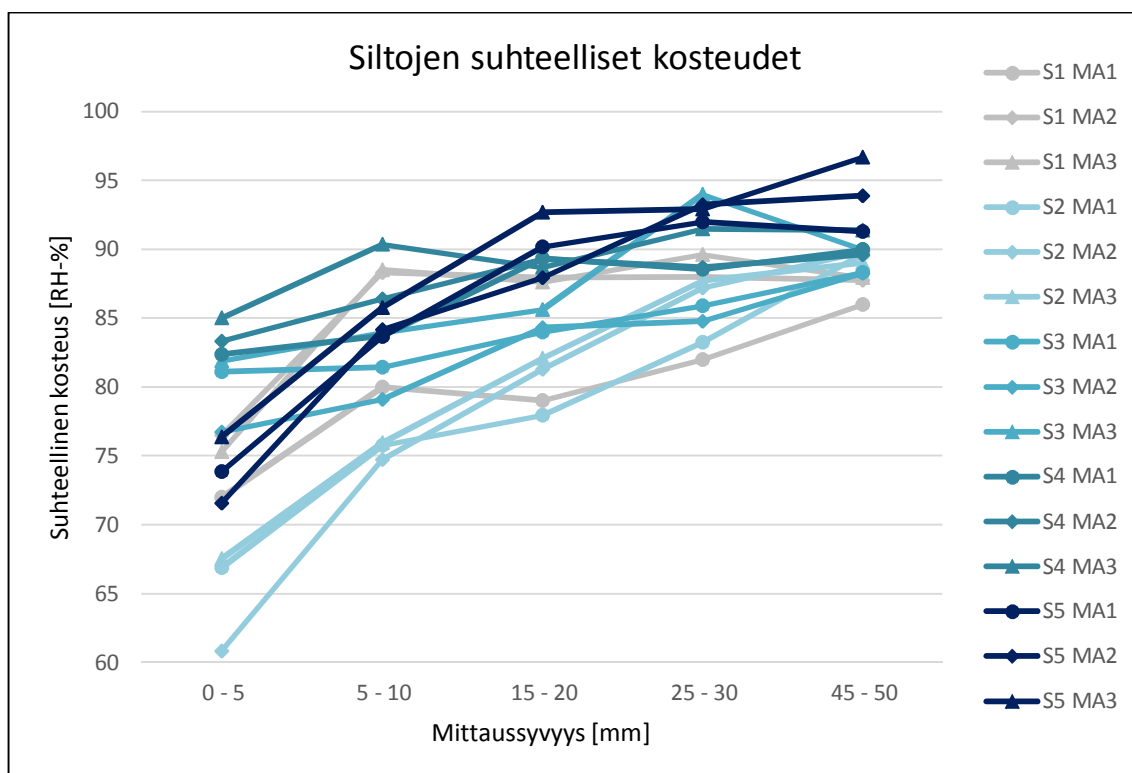


Kuva 45. Sillan 5 absoluuttisen kosteuden mittaustulokset kuivatus-punnitusmenetelmällä syvyyksiltä 0 – 20 mm, 0 – 30 mm ja 0– 50 mm [m-%].

### Suhteellinen kosteus

Suhteellisen kosteuden mittaustulokset vaihtelivat 61 RH-% ja 97RH-% välillä riippuen mittaussyvyydestä ja sillasta. Siltakohtaiset erot pinnan (kuivimman) ja 50mm (kosteimman) tuloksen välillä vaihtelivat 9 RH-%:sta 29 RH-%:iin. Sillan mittausalueiden väliset kosteimman ja kuivimman arvon erot olivat sillalla 1: 14, 12 ja 14 RH-%, sillalla 2: 23, 29 ja 21 RH-%, sillalla 3: 7, 12 ja 8 RH-%, sillalla 4: 8, 6 ja 7 RH-% ja sillalla 5: 18, 22 ja 20 RH-%.

Suhteellisen kosteuden mittaustulokset on esitetty kuvassa 46.

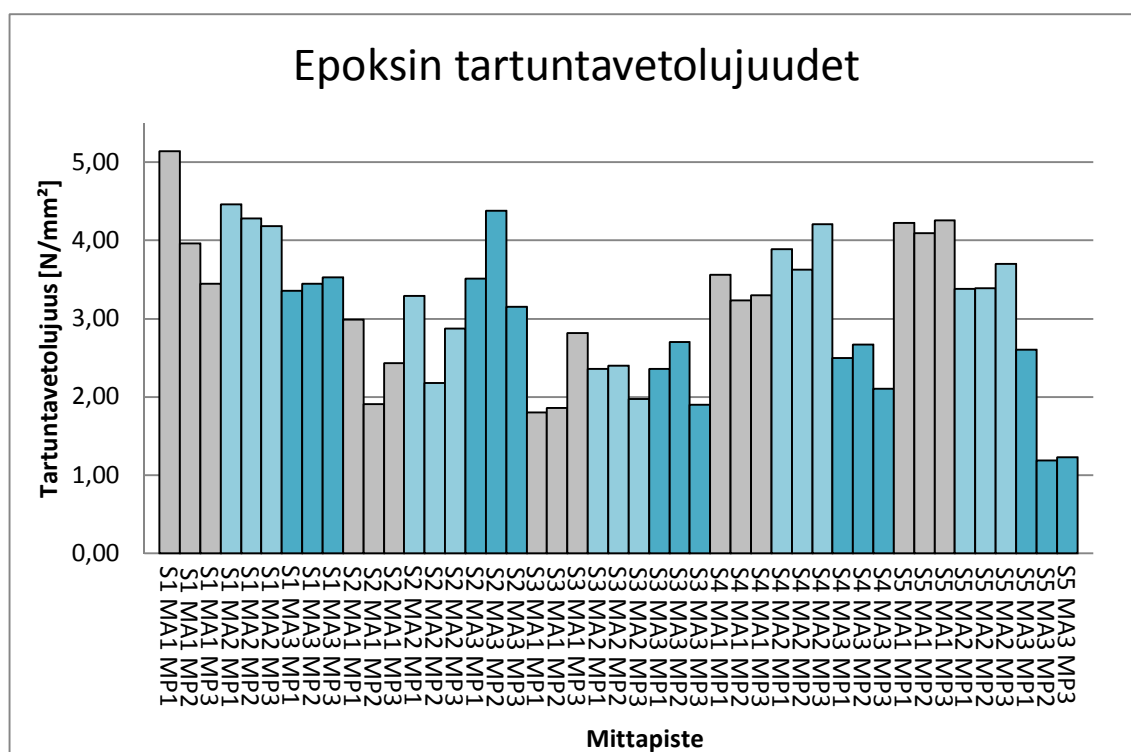


Kuva 46. Suhteellisen kosteuden mittaustulokset [RH-%]

#### 4.3.4 Epoksitiivistystyksen tartuntavetolujuus

Kenttäkokeissa suoritettujen epoksitiivistystyksen tartuntavetolujuuskokeiden tulokset vaihtelivat  $1,19 \text{ N/mm}^2$  ja  $5,14 \text{ N/mm}^2$  välillä. Pienimmät ja suurimmat siltakohtaiset erot olivat  $1,02 \text{ N/mm}^2$  ja  $3,07 \text{ N/mm}^2$ . Mittausalueen sisäiset tulosvaihtelut olivat  $0,17 \text{ N/mm}^2$ :stä  $1,69 \text{ N/mm}^2$ :iin.

Epoksitiivistystyksen tartuntavetolujuuskokeiden tulokset on esitetty kuvassa 47.



Kuva 47. Epoksitiivistystyksen tartuntavetolujuuskokeiden tulokset [ $\text{N/mm}^2$ ].

#### 4.3.5 Epoksitiivistystyksen tiiveyden mittaus matala- ja korkeajännitemenetelmällä

Epoksitiivistystyksen tiiveyden mittauksen suoritti epoksiurakoitsija. Tiiveyden mittauksista ei tehty pöytäkirjaa, vaan urakoitsija merkkasi alueet, joissa tiiveysvaatimus alittui. Merkatut alueet tiivistettiin uudella epoksi- tai hiekkaepoksikerroksella.

Silloilla paikattavat alueet vaihtelivat neulamaisista yksittäisistä rei'istä noin neliön kokoihin alueisiin, joilla epoksitiivistys oli liian ohut.

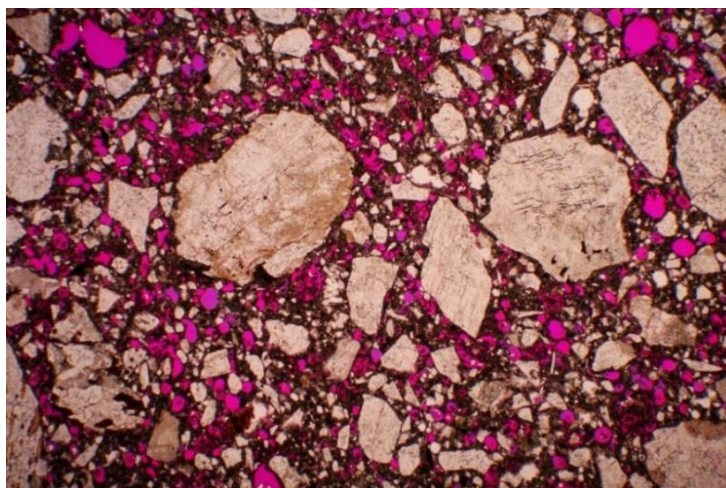
#### 4.3.6 Ohuthieanalyysi

Talukossa 5 on esitetty ohuthieanalyysien tulokset. Suojahuokosten tilavuusprosentit vaihtelivat 5,4 ja 9,3 til-% välillä. Tiivistyshuokosten tilavuusprosentit vaihtelivat 1,0 ja 2,0 til-% välillä ja näistä yhteenlaskettu kokonaisilmamäärä vaihteli 7,4 til-% ja 10,7 til-% välillä. Ominaispinta-alojen tulokset olivat  $27,35 \text{ 1/mm}$ :stä  $38,59 \text{ 1/mm}$ :iin. Huokosjako ( $p/A < 4,33$ ) vaihteli  $0,08 - 0,15 \text{ mm}^2/\text{mm}^3$  välillä.

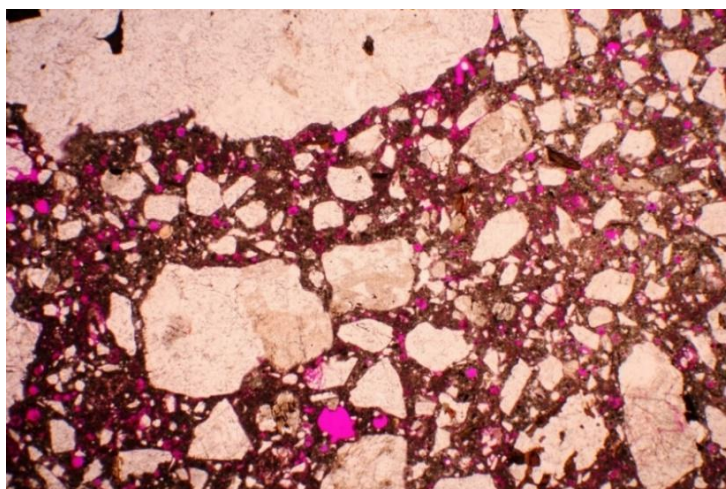
Taulukko 5. Ohuthieanalyysien tulokset

Analyysitulokset	Silta 1	Silta 2	Silta 3	Silta 4	Silta 5
Suojahuokokset [til-%]	7,4	5,4	9,3	8,7	9,3
Tiivistyshuokokset [til-%]	1,7	2,0	1,0	1,9	1,4
Kokonaisilmamäärä [til-%]	9,1	7,4	10,3	10,6	10,7
Ominaispinta-ala [1/mm]	29,78	27,35	34,35	34,79	38,59
Huokosjako ( $p/A < 4,33$ ) [mm <sup>2</sup> /mm <sup>3</sup> ]	0,12	0,15	0,10	0,10	0,08

Ohuthieistä tutkittiin polarisaatio- ja fluoresenssimikroskoopilla epoksin imeytymissyvyyttä sekä huokoisuutta siltakannen yläpinnassa. Kahden ensimmäisen sillan osalta epoksin imeytymissyvyyttä ei pystytty tutkimaan huonolaatuisesta ohuthieimpregnointiepoksista johtuen. Kuvissa 48 – 52 on esitetty kuvia siltakansilta teetetyistä ohuthieistä. Kuvien lyhyt sivu on todellisuudessa 7 mm pituinen. Kuvassa 53 on esitetty fluoresenssimikroskoopilla otettu kuva, josta voidaan havaita epoksin imeytymissyvyyden olevan vain millin kymmenesosa.

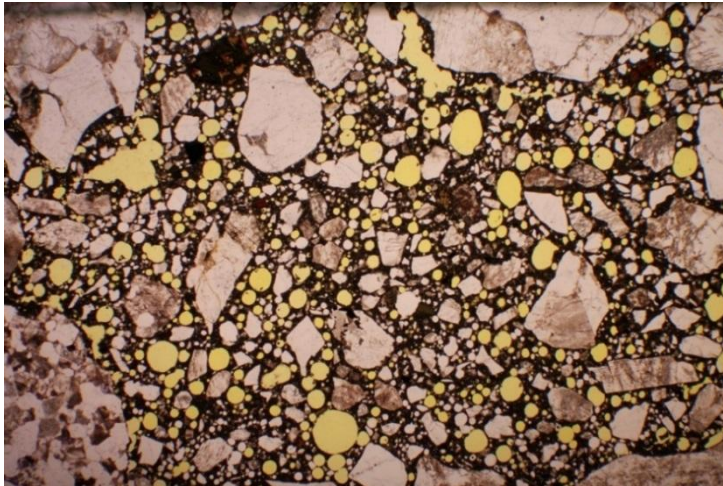


Kuva 48. Sillan 1 ohuthieen mikroskooppikuva. Kokonaisilmamäärä oli 9,1 %, punertavat alueet ovat huokosia, harmaat runkoainetta ja tummanharmaa sementtikiveä.

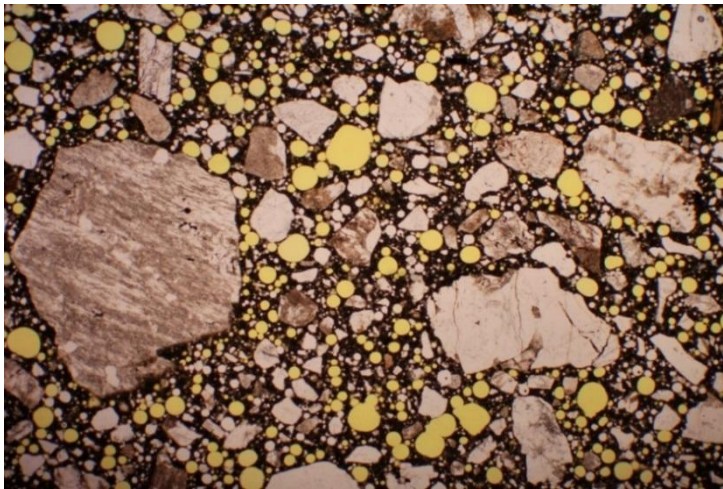


Kuva 49. Sillan 2 ohuthieen mikroskooppikuva. Kokonaisilmamäärä oli 7,4 %, punertavat alueet ovat huokosia, harmaat runkoainetta ja tummanharmaa sementtikiveä.

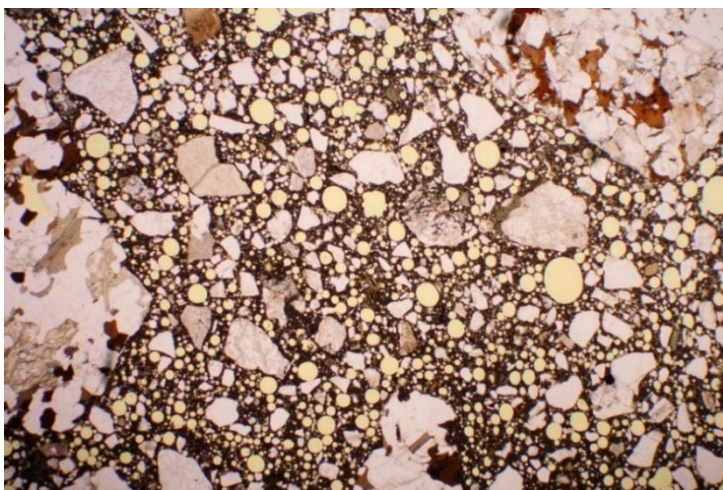




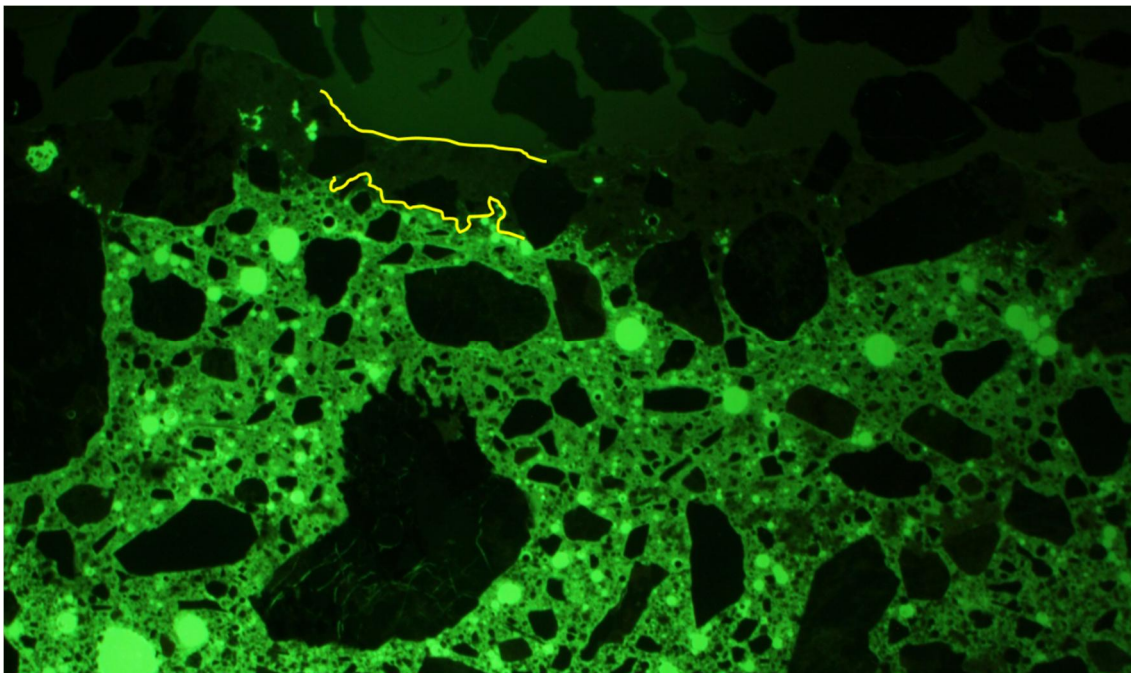
*Kuva 50. Sillan 3 ohuthieen mikroskooppikuva. Kokonaisilmamäärä oli 10,3 %, keltaiset alueet ovat huokosia, harmaat runkoainetta ja tummanharmaa sementtikiveä.*



*Kuva 51. Sillan 4 ohuthieen mikroskooppikuva. Kokonaisilmamäärä oli 10,6 %, keltaiset alueet ovat huokosia, harmaat runkoainetta ja tummanharmaa sementtikiveä.*



*Kuva 52. Sillan 5 ohuthieen mikroskooppikuva. Kokonaisilmamäärä oli 10,7 %, keltaiset alueet ovat huokosia harmaat runkoainetta ja tummanharmaa sementtikiveä.*



*Kuva 53. Fluoresenssimikroskoopilla otettu kuva, josta voidaan havaita epoksitiivistyksen imeytyneen betoniin 0,4 – 0,6 mm (rajattu keltaisella). Kuvan lyhytsivu on todellisuudessa 7mm pituinen. Vaaleammilla alueilla tiheys on pienempi kuin tummemmilla. Vaalean vihreät alueet ovat huokosia, mustat alueet kvartsihiekkaa ja runkoainetta ja muu alue sementtikiveä.*

## 4.4 Tulosten tarkastelu

### 4.4.1 Makrokarheus

Kahta mittausaluetta lukuun ottamatta kaikkien mitta-alueiden karheus vaihteli sallituissa rajoissa (0,3 - 1,2 mm). Sillan 3 mitta-alueen 3 karheus oli kahden mittauksen alueelta alle vaaditun 0,3 mm. Mittausalueen tulokset olivat 0,23 mm ja 0,35 mm. Sillan 4 mitta-alueen 3 karheus ylitti sallitun 1,2 mm arvon yhdessä mittauksessa. Mitta-alueen mittaus-tulokset olivat 1,25 mm, 1,01 mm ja 0,85 mm.

Mittaustulos on hyvin paljon kiinni mittaustekniikasta. Mittauksessa lasihelmet levitetään pyörittämällä kädellä kiekkoa, kunnes lasihelmien leviämispinta-ala ei enää kasva. Kiekkon halkaisija ja massa on määritelty standardissa SFS-EN 13036-1. Kiekkoon ei tulisi kohdistaa voimaa pystysuunnassa. Jos levityskiekkona on menetelmäkuvauksessa PANK-5103 ehdotettu jääkiekko, on ote kiekosta todennäköisimmin sellainen, että kiekoon kohdistuu herkästi kädestä alaspäin suuntautuva voima. Voimaa käytettäessä leviävät lasihelmet laajemmalle alueelle kuin menetelmässä on tavoitteena ja karheudesta tulee todellista pienempi tulos. Jos taas levittäjä lopettaa lasihelmien levittämisen aiemmin kuin menetelmän mukaan pitäisi, saadaan karheudelle suurempi mittaustulos. Lisäksi ko-keentekijä voi aistinvaraisesti valita kohdat, joista uskoo saavansa tavoitteen mukaisen mittaustuloksen.

Liikenneviraston ohjeiden mukaan hiertopinnan tulisi vastata puuhierrettyä betonia. Niin sanotulla helikopterilla hierretty pinta on kuitenkin huomattavasti tasaisempi kuin puu-



hierretty pinta. Jos pinnan karheus on yhden millimetrin luokkaa, kuluu epoksia tiivistykseen enemmän kuin sileämmälle pinnalle. Pinnan korkeammissa kohdissa olevat ohuemat epoksikerrokset aiheuttavat riskin epoksitiivistyksen tiiveydelle.

#### 4.4.2 Tartuntavetolujuus

##### Betonin tartuntavetolujuus

Betonin tartuntavetolujuustulokset ylittivät  $1,5 \text{ N/mm}^2$  arvon viittä vetokoetta lukuun ottamatta, kun arvostelutarkkuutena käytettiin  $0,1 \text{ N/mm}^2$ . Sillan 3 alittavissa tuloksissa  $1,23 \text{ N/mm}^2$ ,  $1,24 \text{ N/mm}^2$  ja  $1,37 \text{ N/mm}^2$  murtotapana oli täydellinen alusbetonin sisäinen murto. Murrot tapahtuivat  $4 - 24 \text{ mm}$  betonin yläpinnasta alaspäin. Murtotapa ja -syvyys viittaavat siihen, että betonissa on ollut joku heikompi kerros mahdollisesti huonosta tiivistyksestä johtuen. Syvin kohta  $24 \text{ mm}$  johtuu todennäköisesti suurehkon kiviainepartikkelin alle jääneistä ilmahuokosista, joten kivi ei ole saanut kunnon tartuntaa sementtigeeliin. Kuvissa 54 – 56 on esitetty vetokokeiden murtopinnat niistä mittapisteistä, joissa tartuntavetolujuusarvo alitti  $1,5 \text{ N/mm}^2$ .



Kuva 54. Murtopinnat vetolujuuskokeesta, tulos  $1,23 \text{ N/mm}^2$ .



Kuva 55. Murtopinnat vetolujuuskokeesta, tulos  $1,24 \text{ N/mm}^2$ .



Kuva 56. Murtopinnat vetolujuuskokeesta, tulos  $1,37 \text{ N/mm}^2$ .

Sillalla 4  $1,5 \text{ N/mm}^2$  arvon alittavissa vetokokeissa murtotapana oli alusbetonin ja kiinnitysliiman sisäinen murto. Mittausalueella 3 tehdyissä vedoissa ensimmäinen vetotulos oli  $1,34 \text{ N/mm}^2$ , murtopinnasta 95 % oli betonin sisäistä murtoa ja 5 % liiman sisäistä murtoa. Kolmannesta vedosta saadun tuloksen  $1,35 \text{ N/mm}^2$  murtopintana oli 80 % betonin sisäistä murtoa ja 20 % liiman sisäistä murtoa. Murtopinnat on esitetty kuvassa 57 ja 58. Murrot tapahtuivat 0 – 3 mm betonin yläpinnasta alaspäin. Tämä viittaisi siihen, että

vetokohdissa on ollut jokin heikompi betonikerros pinnassa, jonka vetolujuusarvo on ollut alle  $1,5 \text{ N/mm}^2$ . Tällainen kerros voi olla esimerkiksi runsashuokoisessa betonissa hierrossa syntyvä ilmapatja tiiviiksi hierretyn betonikerroksen alla (kuva 59). Lisäksi sementtiliiman vetomurtolujuus on ollut alhaisempi kuin  $1,5 \text{ N/mm}^2$  huonosta kuivumisesta johtuen.

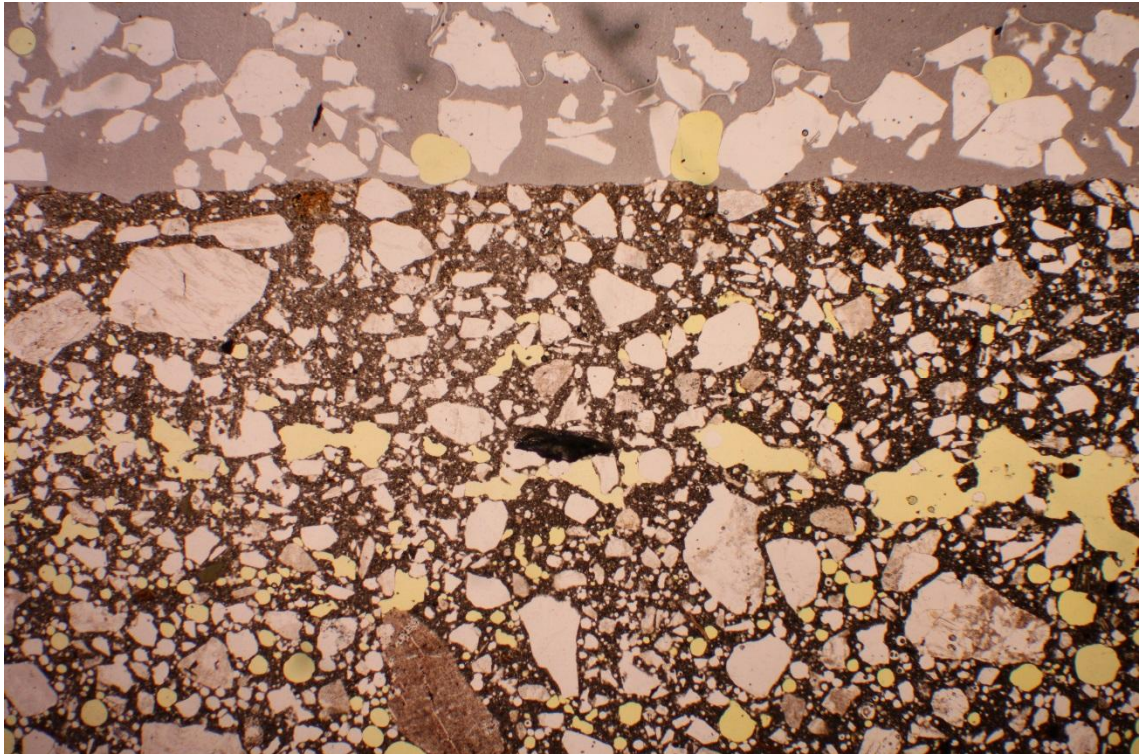


*Kuva 57. Murtopinnat vetolujuuskokeesta, tulos  $1,34 \text{ N/mm}^2$ .*



*Kuva 58. Murtopinnat vetolujuuskokeesta, tulos  $1,35 \text{ N/mm}^2$ .*





*Kuva 59. Ohuthiekuva ilmapatjasta hierron alla noin 2 mm syvyydellä. Kuvan lyhyt sivu on todellisuudessa 7 mm.*

### **Epoksiivistyksen tartuntavetolujuus**

Epoksin tartuntavetolujuuskokeista kaikki tulokset ylittivät vaaditun vähimmäisraja-arvon  $1,0 \text{ N/mm}^2$ . Kaikkien siltojen epoksin tartuntavetolujuusmittausten tulosten keskiarvo ylitti vaaditun  $1,5 \text{ N/mm}^2$ :n rajan.

### **Betonipinnan ja epoksiivistyksen tartuntavetolujuuden vertailu**

Kuvassa 60 on esitetty betonipinnan tartuntavetolujuuksien ja epoksiivistyksen tartuntavetolujuuksien keskiarvoja mittausalueilta.



Kuva 60. Tartuntavetolujuuskokeiden tulosten keskiarvot silloittain betonipinnasta ja epoksitiivistyksestä [ $\text{N/mm}^2$ ].

Kenttäkokeiden perusteella epoksitiivistys nostaa betonipinnan tartuntavetolujuutta. Epoksoinnin jälkeen ei esiintynyt alle  $1,5 \text{ N/mm}^2$  tartuntavetolujuuksia muutamaa poikkeusta lukuun ottamatta. Epoksitiivistyksen tartuntavetolujuuden tulee olla yli  $1,0 \text{ N/mm}^2$ , kunhan tartuntavetolujuuskokeiden tulosten keskiarvo on yli  $1,5 \text{ N/mm}^2$ . Epoksitiivistyksen kovettumisen jälkeen tartuntavetolujuuskokeiden keskiarvot ovat nousseet noin  $0,5 - 2,0 \text{ N/mm}^2$  eli pinnantartuntavetolujuudet ovat kasvaneet 20 – 100 % epoksitiivistyksen jälkeen.

#### Betonin huokoisuuden ja tartuntavetolujuustulosten vertailu

Silloilla 3 ja 4 tartuntavetolujuuskokeista yhteensä viisi tulosta alitti  $1,5 \text{ N/mm}^2$  arvon. Kokonaisilmamäärät näillä silloilla olivat 10,3 % ja 10,6 % ja betonin tartuntavetolujuuskokeiden keskiarvot olivat  $1,60 \text{ N/mm}^2$  ja  $1,71 \text{ N/mm}^2$ . Verrokkina sillan 5 kokonaisilmamäärä huokosanalyysin perusteella oli 10,7 % ja tartuntavetolujuuksien keskiarvo  $2,12 \text{ N/mm}^2$ . Betonin kokonaisilmamäärän ja tartuntavetolujuuksien välillä ei havaittu selkeää yhteyttä. Tähän vaikuttavat muun muassa siltakohteissa mahdollisesti käytetyt eri lujuusluokkien betonit ja betonin ikä koestusvaiheessa.

#### 4.4.3 Kosteusmittaukset

##### Absoluuttinen kosteus

Absoluuttisen kosteuden mittaustulokset olivat pääasiassa vaaditun raja-arvon 5,0 m-% alapuolella. Neljällä sillalla viidestä oli vähintään yksi kosteusmittaustulos, joka ylitti vaaditun raja-arvon. Sillan 3 kaikki kosteusmittaukset alittivat vaaditun raja-arvon. Vaadittu raja-arvo ylittyi sillalla 2 kahdessa, sillalla 1 kolmessa ja sillalla 4 kuudessa mittaustuloksessa. Sillalla 5 kaikki kosteusmittaukset kolmea lukuun ottamatta ylittivät sallitun raja-arvon 5,0 m-% vähintään 0,1 massaprosentilla. Sallitun maksimikosteuden ylityksiä tapahtui kaikilla mittaussyvyyksillä 0 – 20 mm, 0 – 30 mm sekä 0 – 50 mm.



Liikennevirasto on määritellyt raja-arvot betonin absoluuttiselle kosteudelle ennen epok-sitiivistystä. Absoluuttisen kosteuden raja-arvo on aikoinaan otettu käyttöön Saksan sil-taohjeista. Saksassa raja-arvona on käytetty 4,0 m-%, mutta Suomessa todettiin tämän raja-arvon olevan liian alhainen maamme olosuhteisiin eikä sitä yleensä ollut helposti saavutettavissa, joten raja-arvoksi määrättiin 5,0 m-%. Tässä yhteydessä Saksasta oli an-nettu ymmärtää, että näin korkean raja-arvon kanssa tulee ongelmia. [54], [55] Vuonna 2009 VTT:n tekemän Vedeneristysalustan kosteuden mittausmenetelmät ja kriteerit –tut-kimuksessa on absoluuttisen kosteuden raja-arvon 5,0 m-% todettu olevan oikealla tasolla ja jopa hieman lievempi, kuin esimerkiksi Itävallassa ja Saksassa. [49]

Kosteusmittausvyvyys on tällä hetkellä 30 mm, mutta aiempina vuosina se on ollut 20 mm tai 50 mm. Syvempää mittaussyvyyttä on perusteltu varmuuden kasvulla. Koska be-toni kuivuu pääasiassa pinnan kautta, on rakenteessa syvemmillä tyypillisesti enemmän kosteutta kuin pinnassa. Näin ollen, jos mittaussyvyys on 50 mm, pitäisi tulla kosteampia tuloksia kuin 20 mm tai 30 mm syvyydestä vastaavasta kohdasta. Lukumäärällisesti raja-arvon ylityksiä tapahtui suunnilleen yhtä paljon eri syvyyksillä.

Siltakannen betoni voi sisältää suhteellisen isoja kiviainesrakeita. Suomessa käytössä ole-vat kiviaineet ovat yleensä lujuudeltaan kovia kiviaineita, joihin imeytyy suhteellisen vä-hän vettä. Absoluuttisen kosteuden kuivatus-punnitusmittausmenetelmässä ei poisteta ki-viainesta näytekappaleesta, vaan betoninen näytekappale korkeintaan murskataan ennen ensimmäistä punnitusta mittauksen nopeuttamiseksi. Näytekappaleen koostumus vaikut-taa mittaustulokseen hyvinkin paljon. Jos kappaleessa on yksikin iso kiviaineskappale, voidaan saada huomattavasti kuivempi tulos näytteestä kuin näytteestä, jossa isoja kivi-i-neskappaleita ei ole. Tämä osaltaan selittää suuriakin vaihteluita yhden mittausalueen tu-loksissa. Mittauksissa otettiin kaksi halkaisijaltaan 50 mm lieriötä, joiden sahausurat leik-kasivat toisensa. Näin saatiin Liikenneviraston ohjeissa suositeltu 150 g näytemäärä, joka ei ohjeen tekstistä huolimatta täyty yhdellä noin 50 mm halkaisijaltaan olevalla poralieri-öllä. Kahden vierekkäisen lieriön absoluuttisen kosteuden tuloksesta laskettiin keskiarvo, joka oli yhden mittapisteen lopullinen tulos. Kahden vierekkäisen näytekappaleen abso-luuttisen kosteuden tulosten suurin ero oli jopa yli yhden massaprosenttiyksikön suurui-nen.

Absoluuttisen kosteuden mittauksia suoritettiin noin kolminkertainen määrä yleensä sil-lalla suoritettaviin kosteusmittauksiin verrattuna, koska yleensä mittaukset suoritetaan vain kolmesta mittapistestä alle 500 m<sup>2</sup> sillalla eikä kolmesta mitta-alueesta, kuten oh-jeessa määrätään. Laadunvarmistusmittausten lisäksi suoritettiin sama määrä mittauksia 20 mm ja 50 mm syvyydestä. Eli yhteensä sillalta otettiin 27 absoluuttisen kosteuden näytekappaletta. Näin saadaan hyvä kuva mittausalueiden kosteudesta ja tuloksia voidaan kohtalaisesti vertailla keskenään ja suhteellisen kosteuden suhteen.

Kaikilla tutkituilla silloilla oli päällystyslupa 5,0 m-% ylityksistä huolimatta. Suurim-malla osalla silloista luultavasti näytteisiin ei ollut sattunut kohtaa, josta näytteen kosteus olisi noussut yli 5,0 m-%:n. Sillalla 5 urakoitsija oli saanut tilaajalta luvan epoksointiin, kun absoluuttinen kosteus on korkeintaan 6,0 m-%:n. Myöskään tällä sillalla eivät viral-liset mittaukset ole osuneet kohtaan, jossa kosteus olisi ollut yli 6,0 m-%. Yhdessä mit-tauksessa 27:stä tuo 6,0 m-%:n arvo ylittyi. Suurin mittausalueen sisäinen ero tulosten välillä oli 1,4 m-% ja pienin 0,2 m-%, kun vertailtiin samalta syvyydeltä otettujen näyte-kappaleiden tuloksia. Periaatteessa kunnolla sääsuojatun siltakannen betonin kosteusja-kauma pitäisi olla suunnilleen sama koko siltakannella.

InfraRYL 2006 osa 3: Sillat ja rakennustekniset osat –ohjeessa on siltakannelle määritelty suurimmaksi sallituksi kosteuspitoisuudeksi 5,0 m-% ennen eristystöiden aloittamista. Siltakannelta otetaan ohjeen mukaan vähintään yhdeksän näytettä kuivatus-punnitus –kosteusmittausmenetelmää varten. Ohjeessa ei kuitenkaan ole tarkemmin eritelty pitääkö kaikkien otettujen näytteiden alittaa vaadittu 5,0 m-% raja-arvo vai riittääkö, että yhden mitta-alueen keskiarvo alittaa vaaditun raja-arvon. Esimerkiksi epoksitiivistyksen tartuntavetolujuusarvoille on määrätty, että kaikkien tartuntavetolujuuskokeiden tulosten tulee olla vähintään 1,0 N/mm<sup>2</sup> ja kaikkien vetokokeiden tulosten keskiarvon tulee olla vähintään 1,5 N/mm<sup>2</sup>. Ohjeissa ei myöskään ole määritelty miten mahdolliset uusintamittaukset suoritetaan, jos tulokset ylittävät sallitun raja-arvon. Vaihtoehtoina on jokaisella mittauskerralla hakea pintakosteusilmaisimella kostein kohta tai suorittaa uusintamittaukset vanhojen mittakohtien viereen, jolloin tuloksia pystyy periaatteessa vertaamaan keskenään.

### Suhteellinen kosteus

Epoksitiivistyksen levitykselle ei ole käytössä suhteellisen kosteuden raja-arvoa, jonka alituttua epoksitiivistyksen saa levittää. InfraRYL 2006 osa 3: Sillat ja rakennustekniset osat –ohjeessa taulukossa 42310:T1, jossa on esitetty eristysalustan suurin sallittu kosteus ennen eristystöiden aloitusta, on esitetty myös suurin sallittu suhteellisen kosteuden pitoisuus ennen eristystöiden aloittamista. Suurin sallittu suhteellinen kosteuspitoisuus siltakannella ennen eristystöiden aloittamista on 93 RH-% 50 mm syvyyteen tehdyllä porareikämittauksella. Porareikämenetelmä on ollut aikaisemmin käytössä siltakansien suhteellisen kosteuden mittausmenetelmänä, mutta suhteellisen kosteuden mittauksesta on luovuttu, koska porareikämenetelmä ei sovellu ulkorakenteisiin, joissa rakenteen lämpötila vaihtelee hyvinkin paljon. (Vedeneristysalustan kosteus selostus 2009) Vedeneristysalustan kosteuden mittausmenetelmät ja kriteerit –tutkimuksessa on todettu suhteellisen kosteuden mittauksen olevan soveltumaton siltakansille ja siitä onkin luovuttu tässä yhteydessä.

Työssä oli tarkoitus selvittää siltakannen kosteuksia myös suhteellisen kosteuden menetelmällä ja vertailla saatuja tuloksia. Suhteellisen kosteuden näytepalamittausmenetelmällä saadaan suhteellisen kosteuden arvot eri syvyyksiltä ilman lämpötilan muutoksista johtuvaa vaikutusta tuloksiin. Tämä menetelmä on käytössä yleisesti sisätilojen lattioiden päällystettävyyttä arvioitaessa [37] tai ennen pihakannen kermieristystä tehtävissä kosteusmittauksissa. [39]

Kaikkien siltojen suhteellisen kosteuden tulokset pinnasta (0mm) kymmenen millimetrin syvyyteen olivat korkeintaan 90 RH-% suuruisia. Suurimmalla osalla mittausalueista suhteellinen kosteus oli korkeintaan 90 RH-% syvimpään 50 mm mittaussyvyyteen asti. Silloilla 1 ja 2 mikään suhteellisen kosteuden mittaustulos ei ylittänyt 90 RH-%:tia. Sillalla 3 yksi mittaustulos mittausalueelta 3 syvyydeltä 25 mm – 30 mm ylitti 90 RH-% mittaustuloksen (94 RH-%). Sillalla 4 mittausalueen 3 kaksi mittaustulosta ylitti 90 RH-% tuloksen (25 – 30 mm: 92 RH-% ja 45 – 50 mm: 91 RH-%). Sillalla 5 viidestätoista mittaustuloksesta seitsemän ylitti 90 RH-% raja-arvon (MA 1: 25 – 30 mm: 92 RH-% ja 45 – 50 mm: 91 RH-%, MA 2: 25 – 30 mm: 93 RH-% ja 45 – 50 mm: 94 RH-% sekä MA3: 15 – 20 mm: 93 RH-%, 25 – 30 mm: 93 RH-% ja 45 – 50 mm: 97 RH-%).

Epoksin kiinnittymisen suhteen tärkein alue on rakenteen pinta noin 0 – 10 mm syvyyteen asti. Mikroskooppikuvien perusteella epoksi ei imeydy kuin millimetrin kymmenesosia

betoni pintaan eikä tällöin syvemmällä olevalla kosteudella ole merkitystä epoksin kiinnittyvyyteen alustaansa. Epoksin kovetuttua sen alla olevalla kosteuspitoisuudella ei pitäisi olla merkitystä epoksin kiinnipysyvyyteen siltakannella.

Mahdollisia raja-arvoja siltakannen betonipinnan suhteelliselle kosteudelle näytepalamittausmenetelmällä ennen epoksointia voisi olla kymmenen millimetrin syvyydessä < 85 RH-% ja 50 millimetrin syvyydessä < 93 RH-%. Pintaosan 85 RH-% raja-arvo on varmalla puolella SILKO-hyväksytyjen epoksien kosteuden sietokyvyssä ja 50 mm syvyydellä oleva 93 RH-% on alle arvon, jossa tapahtuu kapillaarista kosteuden siirtymistä. Kapillaarisen kosteuden siirtymisarvoa kuivemmassa suhteellisessa kosteudessa kosteus ei siirry betonissa yhtä nopeasti kuin kosteammissa olosuhteissa.

### **Absoluuttisen ja suhteellisen kosteuden vertailu**

Suhteellisen kosteuden näytepalamittaus antaa tarkemman kuvan betonin kosteusjakaumasta eikä tulokseen vaikuta isot kiviainesrakeet, koska ne erotellaan pois näytepalojen joukosta. Näin saadaan paremmin keskenään vertailukelpoisia tuloksia eikä näytteen tulokseen vaikuta näytteenottoa, niin paljon kuin absoluuttisen kosteuden kuivatuspunnitusmenetelmässä. Absoluuttisen kosteuden mittaustulokset riippuvat pitkälti käytetystä betonilaadusta [42].

Absoluuttisen kosteuden mittauksen kuivatuspunnitusmenetelmän voidaan todeta olevan epäluotettava siltakannen betonin kosteuden mittaamiseen. Raja-arvo on päätetty ilman tutkimuksia soveltaen Saksassa käytettyä raja-arvoa. Siltakansien 1 - 3 absoluuttiset kosteusmittaustulokset olivat suhteellisen kuivia. Sillan 4 absoluuttisen kosteuden mittaustulokset olivat lähellä 5,0 m-% ja jotkut yli ja sillan 5 mittaustulokset lähes poikkeuksetta yli 5,0 m-%:n. Suhteellisen kosteuden mittaustulokset olivat kuitenkin kaikilla silloilla betonin pintaosissa (0 – 10 mm) korkeintaan 90 RH-% ja vain 11 suhteellisen kosteuden mittaustulosta syvyydellä 15 – 50 mm ylittivät 90 RH-%. Suurin yksittäinen suhteellisen kosteuden mittaustulos oli 97 RH-% ja loput yli 90 RH-% tulokset olivat korkeintaan 94 RH-%. Porareikämenetelmän suhteellisen kosteuden raja-arvoksi 50 mm syvyydellä on määrätty 93 RH-% InfraRYL 2006 osa 3:ssa. Tähän verrattaessa siltakansista vain silta 5 olisi ollut liian kostea epoksoitavaksi.

### **Kosteuden merkitys epoksitiivistyksen tartuntaan**

Sillalla 5 absoluuttisen kosteuden arvot olivat pääasiassa yli 5,0 m-%. Tästä huolimatta kaikkien mittausaluiden epoksin tartuntavetolujuuskokeiden keskiarvot ylittivät arvon 1,5 N/mm<sup>2</sup>. Mittaosaluiden 1 ja 2 tartuntavetolujuuksien keskiarvot olivat 4,2 N/mm<sup>2</sup> ja 3,5 N/mm<sup>2</sup> ja absoluuttisten kosteusmittausten tulosten keskiarvot olivat 30 mm mittaussyvyydeltä 5,5 m-% molemmilla mittausalueilla. 5,0 m-% raja-arvon ylityksestä huolimatta hyvät tartuntavetolujuuden arvot saattavat selittyä kohtalaisen alhaisilla pinnan suhteellisilla kosteuksilla. Suhteellisen kosteuden mittaustulokset 0-5 mm syvyydessä olivat 74 RH-% sekä 72 RH-% ja syvyydellä 5 – 10 mm tulokset olivat 84 RH-% molemmissa mittausalueissa.

#### 4.4.4 Epoksitiivistyksen tiiveyden mittaus matala- ja korkeajännitemenetelmällä

Matalajännitemenetelmän suurin ongelma liittyy mittauksen paikallisuuteen. Mittaus suoritetaan noin 100 mm × 100 mm alueelle kerrallaan eikä täten ole mahdollista mitata koko siltaa tällaisella menetelmällä.

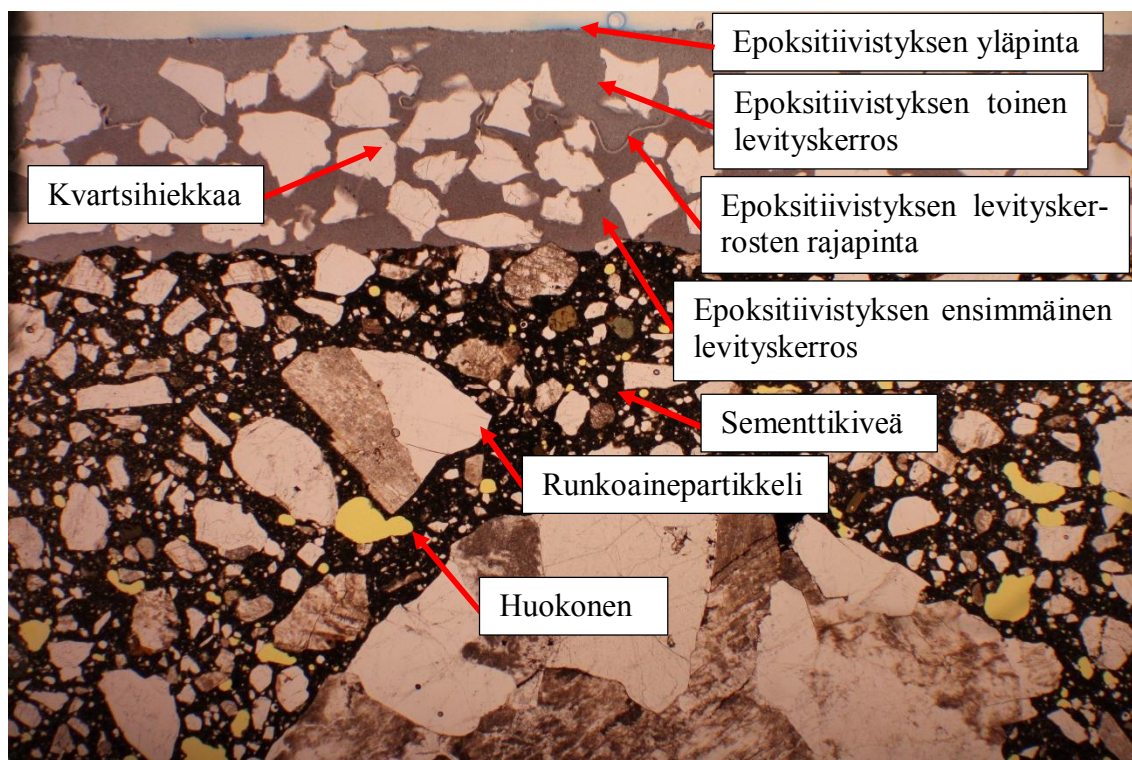
Epoksitiivistyksen tiiveyden mittaus perustuu sähkönjohtavuuden mittaukseen. RA-TEKO:n siltojen laadunvarmistusmittaukset –kurssin tiiveyden mittauskoulutuksen pitäjä on havainnut, että ilmankosteus vaikuttaa kipinäharavan toimintaan. Ilman sähkön johtavuus muuttuu ilman kosteuden muuttuessa. Sähkönjohtavuus kasvaa, kun ilman suhteellinen kosteus kasvaa ja pienenee, kun suhteellinen kosteus vähenee. Talvella sääsuojan sisällä saattaa suhteellinen kosteus olla 20 RH-%, jolloin ilma on todella kuivaa ja läpilyöntijännite olisi kohtalaisen korkea. Korjauskohteissa epoksia tulee käyttää vähintään 3 kg/m<sup>2</sup>, jolloin epoksitiivistyksen paksuus on noin kolme millimetriä. Tästä voi seurata, että kolme millimetriä paksussa epoksitiivistyksessä olevan huokosen läpilyöntijännite on suurempi kuin suurin sallittu 10 kV mittausjännite eikä kipinäharavalla havaita reikää epoksissa. Kolmen millimetrin epoksitiivistyspaksuus ylittyy myös satunnaisesti uudisiltakohteissa toisen tiivistyskerran jälkeen. Näissä tapauksissa saattavat mahdolliset huokokset jäädä havaitsematta tiiveyden korkeajännitemenetelmämittauksissa. [53]

Tiivistysepoxsin kovettumiseen vaadittava aika on yleensä ilmoitettu noin 20 °C lämpötilassa ja on vuorokauden luokkaa. Kesällä tuo vuorokauden kovettumisaika saattaa riittää, kun on hyvät sääolosuhteet. Keväällä, syksyllä ja talvella ilman ja kansilaatan ollessa viileitä tiivistysepoksi saattaa kovettua huomattavasti pidempään. Kuitenkin aikataulupaineista johtuen kermieristys asennetaan yleensä epoksitiivistyksen paikkausten jälkeen seuraavana päivänä. Näissä tapauksissa tiivistysepoksi ei välttämättä ole kovettunut riittävästi. Tiedossa ei ole tutkimuksia, joissa olisi tutkittu kermieristyksen asennuksen vaikutusta osittain kovettuneeseen epoksiin. Asennuksesta johtuva lämpökuorma saattaa laajentaa betonin huokosissa olevaa kosteaa huokosilmaa ja kasvattaa vesihöyryn osapainetta aiheuttaen kuplia epoksitiivistykseen alueilla, joissa ensimmäinen epoksitiivistyksen levityskerros on ohut ja sirotehiekkaa vähän.

#### 4.4.5 Ohuthieanalyysin tulosten tarkastelu

Huokosjaon arvon luotettavuus on analyysin osalta suhteessa analysoituun kokonaispinta-alaan ja analyysimäärään. Analysoidun materiaalin määrää kuvaavat analyysipisteiden kokonaismäärä ja analyysiviivan kokonaispituus.

Tutkimuksissa näytteet otettiin noin 0 – 120 mm syvyydestä, koska märkäporausta ei voitu käyttää betonilieriöiden irrottamiseen. Lieriöt porattiin kuivaporauksella, jotta epoksipaikkaus pystyttiin suorittamaan heti porauksen jälkeen ilman betonin kuivumisen odottamista. Tutkittujen siltakansien paksuudet olivat vähintään 400 mm. Näytteet ja analyysin tulokset eivät siis edusta koko siltakantta, vaan ainoastaan sen pintaosaa. Syvemmillä olevien huokosten ja betonin koostumuksen ei kuitenkaan pitäisi vaikuttaa epoksitiivistyksen yhtenäisyyteen tai pintarakenteiden kuplimiseen. Kuvassa 61 on esitetty ohuthietutkimuksessa otettu kuva epoksitiivistyksestä.



*Kuva 61. Ohuthiekuva epoksitiivistyksestä. Kuvasta voidaan havaita epoksitiivistyksen ensimmäinen ja toinen levityskerta sekä tiivistyksen sisältämä kvartsihiekkä. Betonissa harmaat alueet ovat runkoainetta, tumman harmaa alue on sementtikiveä ja keltaiset alueet ovat huokosia.*

Ohuthieanalyysissä tutkituissa näytteissä huokostuksesta syntyneet huokokset olivat määrältään ja laadultaan tasaisia, joten huokosjaon tulosten hajonnan voidaan olettaa olevan tutkimuksissa luokkaa 0,01 mm. Saadut huokosjaon tulokset ovat noin puolet Siltabetonien P-lukumenettely -ohjeessa vaaditusta minimistä, joten huokosjaon analysoijan luoma mahdollinen virhe ei ole merkitsevä näissä tuloksissa. [52]

Näytteissä ei näkynyt suuria tiivistyshuokosia, joten analyyseistä saatuja kokonaisilmamääriä voidaan pitää luotettavina ja kokonaisilmamäärätulosten keskihajonnan pitäisi olla alle 0,6 %. Suojahuokosten osalta analyysien tulokset ovat yleensä luotettavia (tutkimusten mukaan keskihajonta on yleensä alle 0,6 %) [52]

Menetelmä on suunniteltu betonin pakkasenkestävyyden arviointiin, jota kuvaa menetelmässä huokosten ominaispinta-ala sekä huokosjako. [52] Kokonaisilmamäärää ei pidetä pakkasen kestävyyden osalta oleellisena asiana. Epoksitiivistyksen toteutukseen ja toimivuuteen varsinkin pintaosan kokonaisilmamäärä kuitenkin voi vaikuttaa ja tämän takia myös sitä on tutkittu huokosanalyyseissä.

Kaikkien siltakansien betonin suhteitustietoja tai mitattuja ilmamääriä ei saatu käyttöön. Betonitehtaalta saatiin tieto, että heidän siltakansien betonit suhteitetaan yleensä 4,5 – 6,0 % ilmamäärälle. Sillalla 3 P-lukulaskelmassa käytetty ilmamäärä on 5,9 % ja sillalla 4 koekappaleesta mitattu ilmamäärä on ollut 5,6 % ja viereisellä sillalla, jota ei tutkittu diplomityössä, 5,5 %. Lisäksi eräs betonitehdas kertoi heidän P30-p-luvun siltakansibetonien ilmamäärän vaihtelevan välillä 4,5 – 6,0 %. Työssä vertaillaan silloilta huokosanalyyseillä

saatuja ilmamääriä betonivalmistajan kertomaan suurimpaan ilmamäärään 6,0 % sekä Siltabetonien P-lukumenettely oppaassa kerrottuihin vähimmäisilmamääriin ja ohjeellisiin enimmäisilmamääriin. Vesisementtisuhteet saaduissa suhteitustiedoissa vaihtelevat 0,4 ja 0,5 välillä.

Betonisen siltakannen betonimassan P-lukuvaatimukseksi Silta betonien P-lukumenettely 37/2013 –ohjeessa on esitetty P30. Betonin pakkasenkestävyyden varmistaminen Osa 2., 2000 oppaassa pakkasen kestäville betonille ankarassa pakkasrasituksessa huokosjaon vaatimustasoksi on määritelty 0,22 mm.

Suurin ohjeellinen ilmamäärä P30-p-luvun betonille on 7 %, kun vesi-sideainesuhde on 0,60. P-luvun kasvaessa myös ilmamäärän vähimmäisarvovaatimus kasvaa. Toisin sanoen sovellusohjeen mukaan ilmamäärän kasvaessa myös betonin pakkasenkestävyys paranee. Mitattujen siltojen kokonaisilmamäärät vaihtelivat 7,4 ja 10,7 prosentin välillä. Eli kaikkien siltojen ilmamäärät olivat suurempia, kuin sovellusohjeen ohjeellinen enimmäisilmamäärä P30-p-luvun betonille.

VTT:n 90-luvulla suorittaman kuplatutkimuksen perusteella betonin kokonaisilmamäärä ei saisi ylittää seitsemää prosenttia tai kuplimisriski kasvaa huomattavasti epoksitiivistä-mättömässä betonipinnassa. [16]

Suuri ilmamäärä voi aiheuttaa ilmapatjan parin millin syvyyteen pinnasta, kun hierron vaikutuksesta huokokset yhdistyvät ja pintaan muodostuu kerros, jossa ei ole huokosia. Ilmapatja saattaa haljeta rasituksessa ja hajottaa epoksitiivistyksen vedeneristyksen asentamisen jälkeen. [53]

Aiemmissa tutkimuksissa on todettu, ettei kokonaisilmamäärä saisi olla yli 7 % kuplimisriskin takia. [16]

## 5 YHTEENVETO JA JOHTOPÄÄTÖKSET

Diplomityössä tutkittiin betonisen siltakannen epoksitiivistystä, pintarakenteita ja kuplan muodostumista vedeneristykseen kirjallisuusselvityksen avulla ja viidessä uudissiltakohteessa suoritetuilla laadunvarmistusmittauksiin perustuvilla kenttäkokeilla perehdyttiin laadunvarmistusmittausten sisältöön ja arvioitiin niiden tarpeellisuutta. Keskustelujen perusteella Suomessa kuplimisilmiötä on havaittu vähemmän viime vuosina, mutta ongelmia edelleen on. Suurimmat erot vastaavissa pintarakenneratkaisuissa esimerkiksi Euroopassa liittyvät käytettävien asfalttien laatuun ja kerrospaksuuksiin. Esimerkiksi Saksassa epoksitiivistystä ja kaksinkertaista kumibitumikermieristystä on käytetty menestyksekkäästi useita vuosia. Yhtenäinen epoksitiivistys estää vesihöyryn haihtumisen kumibitumikermieristeen alle ja näin estää pintarakenteiden kuplimisen. Täysin yhtenäisen epoksitiivistyksen toteutuksen on kuitenkin havaittu olevan haastavaa ja tästä syystä kermieristyksen kanssa on havaittu ongelmia. Pintarakenteen kupliminen aiheuttaa nopean korjaustarpeen ja lyhentää sillan korjausten väliä.

Olosuhteisiin, jossa työ suoritetaan, tulee kiinnittää erityistä huomiota. Olosuhteiden seuraamisen lisäksi olisi hyvä ohjeistaa toimivan sääsuojan rakenne ja sitä, miten päästään haluttuihin olosuhteisiin sääsuojan sisällä erilaisissa säätilanteissa. Tarjousvaiheessa pitäisi vaatia epoksoinnille olosuhteiden mukaista materiaalivalmistajan esittämää kovettumisaikaa. Kiireeseen kannustavassa, ennen sovittua luovutusaikaa valmistuvasta urakasta maksettavasta korvauksesta, korvauksen laskennassa voitaisiin ottaa huomioon oletetun betonin kuivumisajan pidentyminen.

Eristysalustan pinnan karheuden mittauksissa makrokarheustulosten vaihteluväli asettui suurimmaksi osaksi vaatimuksena olevalle 0,3-1,2 mm karheusvälille. Suurin osa mitaustuloksista sijoittui kuitenkin lähemmäksi 0,3 mm raja-arvoa ja osa jopa sen alle. Tämä johtuu silloilla käytössä olevasta koneellisesta hiertomenetelmästä. Työssä tehtyjen tartuntavetolujuusmittausten perusteella makrokarheus ei vaikuta epoksitiivistyksen tartuntaan, vaikka aiemmissa tutkimuksissa on todettu karheamman pinnan parantavan tartuntaa. Makrokarheuden mittauspaikat voi mittaa itse ja näin vaikuttaa tuloksiin valitsemalla aistinvaraisesti tarkasteltuna sopivat paikat. Tutkimuksen perusteella makrokarheuskoetta voidaankin pitää lähinnä suuntaa antavana menetelmänä, jolla edes jotenkin dokumentoidaan betonipinnan karheus ennen eristystöitä.

Betonin tartuntavetolujuudelle ei ole asetettu vaadittavaa raja-arvoa ennen epoksitiivistyksen asennusta eikä betonipinnan tartuntavetolujuutta ole ohjeistettu mittaamaan. Osa kenttäkokeessa suoritetuista betonin tartuntavetolujuuskokeiden tuloksista alittivat betonirakenteille yleensä vaaditun 1,5 N/mm<sup>2</sup> arvon. Epoksitiivistyksen jälkeen tartuntavetolujuustulosten keskiarvot kasvoivat kaikissa mittausalueissa ja lähes kaikki tulokset ylittivät 1,5 N/mm<sup>2</sup> vaatimusarvon. Tutkimuksen perusteella betonin tartuntavetolujuutta ei ole tarkoituksenmukaista mitata jatkossakaan, koska vain kaksi epoksitiivistyksen tartuntavetolujuuskoetulosta alittivat 1,5 N/mm<sup>2</sup> ja tämänkin mittausalueen keskiarvo ylitti vaadittavan 1,5 N/mm<sup>2</sup> keskiarvon.

Tällä hetkellä siltakansilla on käytössä absoluuttisen kosteuden mittaus, jolla tutkitaan betonisen siltakannen riittävä kuivuminen ennen epoksitiivistyksen levittämistä. Saksassa ja Itävallassa kosteusraja-arvoksi on määritetty 4,0 m-%, kun taas Suomessa raja-arvoksi on asetettu 5,0 m-%. Absoluuttisten kosteusmittauksen menetelmää ei juurikaan käytetä



Suomessa betonin kosteuden mittaamiseen muilla rakentamisen osa-alueilla. Muilla rakentamisen osa-alueilla on pääasiassa käytössä suhteellisen kosteuden mittaussuhteiden joko näytepalamittauksena tai sisätiloissa porareikämittauksena.

Kenttäkokeissa havaittiin, että absoluuttisen kosteuden mittaustulokseen kuivatus-punnitusmenetelmällä vaikuttaa mittaustulokseen ja näytteen rakenne. Kuivatus-punnitusmenetelmässä vierekkäiset tulokset vaihtelevat, koska näytekappaleet sisältävät erilaisia määriä runkoainetta. Tästä johtuen siltakannen kuivumista on vaikea seurata, koska eri kohdista otetut näytteet antavat erilaisen tuloksen. Absoluuttisen kosteuden uusintamittausmenetelmästä ei ole olemassa ohjeistusta, jos mittaussuhteet ylittävät sallitun raja-arvon. Hyvissä olosuhteissa tapahtuneesta usean viikon kuivattamisesta huolimatta betonin absoluuttinen kosteus ei välttämättä laske alle 5,0 m-%. Tällaisissa tapauksissa olosuhteiden hallintaan ja betonin kuivattamiseen voidaan investoida suuria summia rahaa ja aikataulu venyy ilman selkeää hyötyä.

Työn koeosuuden perusteella betonin kuivumisen seuranta on suositeltavampaa toteuttaa suhteellisen kosteuden mittauksin kuin absoluuttisen kosteuden mittauksin. Näytepalamenetelmässä runkoaine ei juuri vaikuta mittaustulokseen. Näin saadaan paremmin vertailukelpoisia tuloksia mittauksista. Suhteellinen kosteus voidaan mitata halutulta syvyydeltä. Tämä mahdollistaa betonin pintaosan (0 – 70 mm) kosteusjakautumisen tutkimisen. Myös uusintamittauksien tulosten vertailu on mahdollista, koska runkoainekappaleet eivät juuri vaikuta tuloksiin. Näytepalamenetelmällä saataisiin siltakannesta luotettavia kosteusmittaustuloksia, joiden perusteella kuivattaminen voitaisiin lopettaa, kun määriteltävät raja-arvot olisivat alittuneet. Suhteellisen kosteuden näytepalamenetelmällä voitaisiin esimerkiksi mitata siltakannen betonin pintaosan 0 – 10 mm syvyydeltä kosteus, jolla on suurin vaikutus epoksin imeytymiseen. Näytepalamittauksen yhteydessä voidaan näytteitä ottaa myös syvemmältä, jos nähdään tarpeelliseksi esimerkiksi 50 mm syvyyden kosteustieto.

Kenttäkokeiden huokosanalyysien perusteella tutkittujen siltakansien kokonaisilmamäärät ovat pääasiassa selvästi korkeampia kuin ohjeelliset enimmäisilmamäärät. Huokosanalyysin kokonaisilmamäärät ylittivät kaikilla silloilla aiemmissa tutkimuksissa asetetun 7 % raja-arvon. Periaatteessa pakkasenkestävyys paranee, kun ilmamäärä kasvaa, mutta ilmamäärä vaikuttaa myös betonin muihin ominaisuuksiin. P-lukumenettelyssä on esitetty ohjeelliset enimmäisilmamäärät niin, etteivät betonin muut ominaisuudet kärsi. Esimerkiksi sillan 4 ilmamäärä on lähes kaksinkertaistunut rakennustyön yhteydessä tehtyjen mittauksien ja ohutietutkimuksen välillä. Tiedossa ei ole, onko ilmamäärän mittaussuhteiden ajankohtaa, mutta joka tapauksessa betonin ilmamäärä on lisääntynyt oleellisesti suoritetun mittauksen jälkeen.

Tutkimuksen perusteella jatkotutkimuksissa tulisi selvittää, mistä kovettuneen betonin kokonaisilmamäärä johtuu ja miten se mahdollisesti vaikuttaa epoksitiivistyksen yhtenäisyyteen. Suurella kokonaisilmamäärällä saattaa olla vaikutusta myös rakenteen pitkäaikaiskestävyyteen. Lisäksi olisi hyvä selvittää epoksien kovettumisaikaa eri lämpötiloissa ja kermieristyksen asentamisen vaikutuksia osittain kovettuneeseen epoksitiivistykseen kostean ja kuivan betonin pinnassa. Sääsuojarakenteita pitäisi vielä kehittää ja ohjeistaa toimivat sääsuojaratkaisut ja millä menetelmillä saadaan sopivat olosuhteet sääsuojan sisällä. Kosteuden mittaamista tulisi edelleen tutkia ja määrittää suhteelliselle kosteudelle raja-arvot ja laatia tarvittava ohjeistus suhteellisen kosteuden näytepalamenetelmän käyttöön ottamiseksi siltakannen kosteusmittausmenetelmänä.

## LÄHDELUETTELO

- [1] Adamson, B, Ahlgren, L., Bergström, S.G., Larsson, P-G., Mattson, P-O. 1973. Fukt i golv och väggar. Stockholm, Statens institut för Byggnadsforskning, rapport 11,115 s.
- [2] Ahlgren, L. 1972. Fuktfixering i porösa byggnadsmaterial. Rapport 36. Institutionen för byggnadsteknik, Tekniska Högskolan i Lund. 200 s.
- [3] Alimex Oy. 2014. Tiivistysepoksit, Gremmler 1403, Gremmler 1403 R (Rapid). Tekninen tuotekortti. Järvenpää. 8 s.
- [4] Al-Neshawy, F. 1996. Sementtityypin, silikan ja huokostamisen vaikutus betonin kuivumiseen. Diplomityö. Teknillinen korkeakoulu, Rakennus- ja yhdyskuntatekniikan osasto, Betonitekniikka, 101 s.
- [5] Betonghandbok. 1997. Material, utgåva 2. Svensk Byggtjänst. Stockholm, 1127 s.
- [6] Blomberg, T., Bitumit. Rakentajainkustannus Oy. Gummerus Kirjapaino Oy, Jyväskylä 1990. 154 s. ISBN 951-676-488-6.
- [7] Copeland, L.E., Bragg, R.H. 1955. Self-desiccation in Portland-cement pastes, ASTM Bulletin, No 204, s. 34-39.
- [8] European Asphalt Pavement Association. 2013. Asphalt pavements on bridge decks. EAPA Position paper. Brysseli. 33 s. <http://www.eapa.org/userfiles/2/Publications/EAPA%20Paper%20-%20Asphalt%20pavements%20on%20Bridge%20Decks%20-%202013.pdf> (käyty 21.10.2015)
- [9] Hailesilassie, B. W., Hean S., Partl M. N. Testing of blister propagation and peeling of orthotropic bituminous waterproofing membranes. 2013. DOI: 10.1617/s11527-013-0217-z
- [10] Hailesilassie, B. W. 2013. Mechanisms of Blister Formation on Concrete Bridge Decks with Waterproofing Asphalt Pavement Systems, Licentiate Thesis. Tukholma 2013. Division of Highway and Railway Engineering
- [11] Hailesilassie, B. W., Partl, M.N. Mechanisms of Asphalt Blistering on Concrete Bridges, J. of ASTM International, Vol. 9. 2012. DOI: 10.1520/JAI104135. (PAPER I)
- [12] Hailesilassie, B.W., Partl, M.N., Adhesive Blister Propagation under an Orthotropic Bituminous Waterproofing Membrane' Construction & Building Materials. 2013. (PAPER II)
- [13] Hedenblad, G. 1993. Moisture permeability of mature concrete, cement mortar and cement paste PH.D thesis Division of Building Material, Lund Institute of Technology. Report TVBM-1014, 250 s.
- [14] Hedenblad, G. 1995. Fuktsäkerhet i byggnader. Uttorkning av byggfukt i betong – Torktider och fuktmätning. Byggnadsforskningrådet T12:1995, 54 s.
- [15] Id Emmi., Diplomityö. Siltarakenteiden todelliset korjausvälit Pohjoismaissa. Aalto-yliopisto. Espoo 2012. 100 s.

- [16] Laukkanen, K. & Parol, H. & Pitkänen, P & Vesikari, E. 1998. Siltojen kermieristysten kuplimisen estäminen, Loppuraportti, Tielaitoksen selvityksiä 45/1998. Oy Edita Ab, Helsinki. 95 s. ISBN: 951-726-474-7. ISSN: 0788-3722. TIEH: 3200536.
- [17] Leivo, M., 2000. Betonin pakkasenkestävyyden varmistaminen Osa 2. Laadunvalvonta ja –varmistus. VTT Tiedotteita 2047. Espoo. 30 s. ISBN: 951-38-5690-9 ISSN: 1235-0605
- [18] Liikennevirasto. Siltojen korjausohjeet, SILKO. <http://alk.tiehallinto.fi/sillat/>.
- [19] Liikennevirasto. 1999 – 2008. Siltojen tyyppipiirustukset – Vedenjohtolaitteet DS (1999, 2008), Tippuputki DT (2008). Destia. [http://portal.liikennevirasto.fi/sivu/www/f/urakoitsijat\\_suunnittelijat/vaylanpidon\\_ohjeet/sillat/tyyppipiirustukset/20110707\\_vedenjohtolaitteet\\_tippuputki#.ViiD9yuIM6F](http://portal.liikennevirasto.fi/sivu/www/f/urakoitsijat_suunnittelijat/vaylanpidon_ohjeet/sillat/tyyppipiirustukset/20110707_vedenjohtolaitteet_tippuputki#.ViiD9yuIM6F) (käyty 22.10.2015)
- [20] Liikennevirasto. 2013 a. Sillantarkastuskäsikirja Suunnittelu- ja toteuttamisvaiheen ohjaus. Liikenneviraston ohjeita 26/2013. Helsinki. 142 s. ISSN-L: 1798-663X. ISSN: 1798-663X. ISBN: 978-952-255-409-3
- [21] Liikennevirasto. 2013 b. Siltabetonien P-lukumenettely. Liikenneviraston ohjeita 37/2013. Helsinki. 32 s. ISSN-L: 1798-663X. ISSN: 1798-6648. ISBN: 978-952-255-1
- [22] Liikennevirasto. 2014. Eurokoodin soveltamisohje. Siltojen kuormat ja suunnittelu-perusteet - NCCII. Liikenneviraston ohjeita 24/2014. Helsinki. 128 s. ISSN-L: 1798-663X. ISSN: 1798-6648. ISBN: 978-952-255-483-3.
- [23] Liikennevirasto. 2015 a. Siltojen vedeneristysten SILKO-tuotevaatimukset. Liikenneviraston ohjeita 9/2015. Helsinki. 36 s. ISSN-L: 1798-663X. ISSN: 1798-6648. ISBN: 978-952-317-0
- [24] Liikennevirasto. 2015 b. Siltojen vedeneristystyömaan laadunmittaus. Liikenneviraston ohjeita 26/2015. Helsinki. 62 s. ISSN-L: 1798-663X. ISSN: 1798-6648. ISBN: 978-952-317-153-4
- [25] Lindberg, R., Wahlman, J., Suonketo, J., Paukku E. 2002. Kosteusvirtatutkimus. Tampereen teknillinen korkeakoulu, Talonrakennustekniikka. Julkaisu 119. Tampere, 54 s. + 11 liitet.
- [26] Littmann K., Players, G. 2000. Influence of application parameters on the durability of polymer coating on concrete. Materials Week, München 25.09.2000 - 28.09.2000, Hrsg: Dt. Keram. Ges, s.12.
- [27] Merikallio, T., 2009. Betonilattian ”riittävän” kuivumisen määrittäminen uudisrakentamisessa. Väitöskirja. Espoo, 136 s.
- [28] Manning, D. Waterproofing membranes for concrete bridge decks. National Cooperative Highway Research Program. Synthesis of Highway Practice 220. National Academy Press, Washington, D.C 1995. 59 s. ISSN 0547-5570. ISBN 0-309-05863-5.
- [29] Nilsson, L-O. 1979. Fuktmätning Del 2 av byggfukt i betongplatta på mark, torknings och mätmetoder. Avdelningen för byggnadsmaterial. Lunds Tekniska Högskola. Rapport TVBM-3008, 75 s.

- [30] Nilsson, L-O. 1980. Hygroscopic moisture in concrete. Drying, Measurements & Related Material Properties. Lund, Lund Institute of Technology, Division of Building Materials, Report TVBM-1003,162 s
- [31] Nilsson, L-O, Sjöberg, A., Togerö, Å. 2005. Fuktmätning i byggnader. En informationsskrift. Lund Tekniska Högskola. TVBM-7188,64 s.
- [32] Noponen, S., 2014. Betonikantisen sillan pintarakenteiden kestävyys ja elinkaarikustannukset. Lisensiaattityö. Espoo, 153 s.
- [33] Norling-Mjörnell K. 1997. Moisture Conditions in High Performance Concrete-mathematical modelling and measurements. Department of Building Materials. Chalmers University of Technology, Goteborg. P-97:6,126 s.
- [34] Pihlajavaara, S.E. 1964. Johdatus betonin kuivumisilmiöihin. Helsinki, Valtion teknillinen tutkimuslaitos, 115 s.
- [35] Powers, T.C., Browyard, T. L. 1947. Studies on the physical properties of hardened Portland cement paste, Journal of the American Concrete Institute, Proceedings 43. PCA, Bulletin 22, Chicago, s. 992-101
- [36] Päällystealan neuvottelukunta, PANK Ry. Asfalttinormi 2011. Gummerus kirjapaino, Jyväskylä 2011. 118 s. 978-952-99985-1-7.
- [37] Rakennustieto Oy. 2010. Betonin suhteellisen kosteuden mittausta. RT 14-10984.
- [38] Rakennustieto Oy. Infrayl 2006. Osa 3. Sillat ja rakennustekniset osat. Sillat ja erittelemättömät betoni-, teräs- ja puurakenteet. RT 14-10920. Karisto Oy, Hämeenlinna 2008. 278 s. ISBN 978-951-682-882-7.
- [39] RIL 107-2012 Rakennusten veden- ja kosteudeneristysohjeet. 2012. Suomen Rakennusinsinöörien Liitto RIL r.y. 219 s. ISBN: 978-951-758-545-3
- [40] Rosenberg J. 2000. Thin pavements with synthetic binder used in Denmark. Asphalt De, Danish Road Institute; Roskilde
- [41] Russel, H., G. 2012. Waterproofing Membranes for Concrete Bridge Decks. NCHRP synthesis 425. A Synthesis of Highway Practice. National Cooperative Highway Research Program. Illinois. ISSN: 0547-5570. ISBN: 978-0-309-22346-1.
- [42] Saarinen, J., 2010. Alustabetonin kosteuspitoisuuden vaikutus pinnoitteen tartuntaan. Diplomityö, Espoo, 134 s.
- [43] Sjöberg, A. 2001. Secondary emission from concrete floors with bonded flooring materials – Effects of alkaline hydrolysis and stored decomposition products. Chalmers University of technology. Department of Building Materials. Göteborg, 188 s.
- [44] Sto Finexter Oy. 2014. StoPox BV NF/NFR Tekninen tietolehti. 4 s.
- [45] Suomen betoniyhdistys ry. 2007. BY 41 Betonirakenteiden korjausohjeet 2007. Suomen rakennusmedia Oy. 110 s. ISBN: 978-952-5075-85-4

- [46] Suomen standardisoimisliitto. 1988. SFS 5446 Betoni. Tartuntalujuus. Standardi. Helsinki. 2 s.
- [47] Suomen standardisoimisliitto. 2010. SFS-EN 13036-1 Road and airfield surface characteristics. Test methods. Part 1: Measurement of pavement surface macrotexture depth using a volumetric patch technique. Standardi. Helsinki. 11 s.
- [48] VTT. 2001. Betonisen siltakannen tiivistysepoxsin vesitiiveyden mittaus. Matalajännitemenetelmä. Menetelmäkuvays Nro VTT 2654-2001. Espoo. 3 s.
- [49] VTT. 2009. Vedeneristysalustan kosteuden mittausmenetelmät ja kriteerit. Tutkimuslöstus Nro VTT-S-08802-09. Espoo. 53 s.
- [50] VTT. 2013 a. Betonisen siltakannen absoluuttisen kosteuden mittaus. Kuivatus-punitusmenetelmä. Menetelmäkuvaus Nro VTT 2650-2013. Espoo. 3 s.
- [51] VTT. 2013 b. Siltakannen nestemäisenä levitetyn vedeneristysten tai tiivistysepoxsin vesitiiveyden mittaus. Korkeajännitemenetelmä. Menetelmäkuvaus Nro VTT-S-05050-09. Espoo. 7 s.
- [52] VTT Expert Services Oy. 2011. Betonin ilmahuokosparametrien määrittäminen ohut-  
hietä. Menetelmäkuvaus VTT-TEST-R003-2010. Espoo. 11 s.
- [53] Ohjausryhmän seurantakokousten keskustelut 2013 – 2015
- 17.5.2013, Espoo
  - 15.8.2013, Espoo
  - 25.11.2013, Helsinki
  - 20.3.2014, Espoo
  - 6.2.2015, Espoo
  - 24.9.2015, Espoo
- [54] Kyösti Laukkasen haastattelu. 18.10.2013, Helsinki
- [55] Jouko Lämsän haastattelu. 16.1.2014, Helsinki

## **LIITE 1: InfraRYL 2006 Osa 3:n mukaiset laadunvarmistustoimenpiteet silloissa**

### **42001.4 Sillat, laadunvarmistus**

#### **42001.4.1 Yleistä**

##### **Vaatimukset**

.1 Valmiin sillan ja rakennustyön hyvän laadun edellytyksiä ja laadunvarmistuksen keinoja ovat:

- yksityiskohtaiset ja laadukkaat pysyvien rakenteiden suunnitelmat
- selkeät ja yksityiskohtaiset tuotantosuunnitelmat
- jatkuva laadun ohjaus
- laaduntarkastus työvaiheittain
- laaturaportointi.

.2 Laadun varmistamiseksi laaditaan jäljempänä esitettyjen vaatimusten mukaiset laatu- ja muut tuotantosuunnitelmat. Kaikki suunnitelmat laaditaan selkeästi ja yksityiskohtaisesti.

.3 Suunnitelmien laadinnassa otetaan huomioon tässä ja muissa sopimusasiakirjoissa esitetyt vaatimukset ja ohjeet sekä liikenteen, työturvallisuuden ja ympäristönsuojelun asetamat vaatimukset.

.4 Suunnitelmat toimitetaan tilaajan edustajalle sopimusasiakirjoissa määriteltyjen aikarajojen mukaisesti.

##### **Ohje**

Perustelluissa tapauksissa suunnitelmat voidaan toimittaa töiden edistymisen mukaisesti. Tällöin puhutaan suunnitelmien jatkuvasta päivittämisestä.

.5 Suunnitelmien muutoksiin hankitaan tilaajan edustajan lupa ennen töiden aloittamista.

.6 Työtä ohjataan, tarkkaillaan ja tarkastetaan laadunhallintajärjestelmän asiakirjoissa ja tuotantosuunnitelmissa kuvatulla tavalla.

.7 Vaadittujen suunnitelmien lisäksi laaditaan jäljempänä kuvatut tarkastus-, testaus- ja mittauspöytäkirjat sekä laatu- ja poikkeamaraportit, jotka luovutetaan tilaajan edustajalle.

.8 Urakoitsija säilyttää kaikkia suunnitelmia ja raportteja liitteineen vähintään takuutar-  
kastukseen asti.



InfraRYL 2006 Osa 3:n mukaiset laadunvarmistustoimenpiteet silloissa

## **42001.4.2 Urakan laatusuunnitelma**

### **Vaatimukset**

.1 Ennen rakennustöiden aloittamista laaditaan urakan laatusuunnitelma, joka kattaa kaikki sopimusasiakirjojen mukaiset työt.

### **Ohje**

Urakan laatusuunnitelma on sopimuskohtainen, joko yhtä tai useampaa erillistä työmaata koskeva laatusuunnitelma.

.2 Urakan laatusuunnitelmassa esitetään mm. seuraavat asiat:

- työnjohto- ja laaduntarkastusorganisaatio (henkilöt, vastuut, toimivalta, tehtävät ja pätevyysvaatimukset)
- laadunvarmistuksen apuneuvot (esim. SILAVA tai muu vastaava laadunvarmistusohjelmisto)
- rakentamisaikataulu työvaiheiden tarkkuudella
- rakentamisessa ja laadunvarmistuksessa käytettävä erikoiskalusto
- varautuminen työn toteutukseen liittyviin riskeihin ja poikkeustilanteisiin
- omien töiden laadunvarmistus (mm. selvitys työmaan sisäisestä laadunohjauksesta, -tarkkailusta ja -tarkastuksesta sekä suunnitelmien läpikäynti työntekijöiden kanssa)
- alihankkijoiden töiden ja toimitusten laadun varmistaminen
- laatupoikkeamien käsittely
- yhteistyö tilaajan, suunnittelijan, alihankkijoiden ja muiden sillan rakentamisen osapuolien kanssa
- viestintälaitteet.

### **Ohje**

Teetettäessä siltatöihin kuuluvia erikoistöitä alihankintana laaditaan niistä yleensä erillinen työkohtainen laatusuunnitelma (esim. teräsrakennetyön laatusuunnitelma), jossa esitetään kyseisestä työstä samat asiat kuin urakan laatusuunnitelmassa.

.3 Urakan laatusuunnitelmassa esitetään myös luettelo laadittavista työvaiheen laatusuunnitelmista ja teknisistä työsuunnitelmista.

.4 Urakan laatusuunnitelma toimitetaan tilaajalle urakan aloituskokouksessa.

InfraRYL 2006 Osa 3:n mukaiset laadunvarmistustoimenpiteet silloissa

#### **42001.4.3 Työvaiheen laatusuunnitelma**

##### **Vaatimukset**

- .1 Kaikista työvaiheista laaditaan työvaiheen laatusuunnitelma.
- .2 Samassa suunnitelmassa voidaan esittää yhden tai useamman työvaiheen, esim. rakennesan laadunvarmistus.
- .3 Työvaiheen laatusuunnitelmaan sisällytetään mm.
  - yleiskuvaus työvaiheen toteuttamisesta ja siihen liittyvistä menettelyistä (ellei erillistä teknistä työsuunnitelmaa ole laadittu)
  - työnaikainen laadunvarmistus (työtä edeltävät, sen aikana ja työn jälkeen tehtävät tarkastukset, mittaukset ja muut laadunohjaustoimenpiteet)
  - työnaikaiset toleranssit, joita noudattamalla pyritään varmistumaan siitä, että rakenne valmistuttuaan täyttää sille asetetut laatuvaatimukset
  - vaatimustenmukaisuuden osoittaminen (vaatimustenmukaisuuskokeiden määrät, menettelyt, ajankohdat, välineet, vastuuhenkilöt, tutkimuslaitokset)
  - vaatimustenmukaisuuskokeiden tulosten dokumentointi.
- .4 Työvaiheen laatusuunnitelma toimitetaan tilaajan edustajalle viimeistään viikkoa ennen kyseiseen suunnitelmaan sisältyvien töiden aloittamista.

#### **42001.4.4 Tekninen työsuunnitelma**

##### **Vaatimukset**

- .1 Sillan rakennussuunnitelmassa ja InfraRYL jakson 42000 materiaalikohtaisissa luvuissa on lueteltu ne työt, joista laaditaan erillinen tekninen työsuunnitelma.
- .2 Teknisessä työsuunnitelmassa esitetään yksityiskohtaisesti:
  - käytettävät resurssit ja työkapasiteetit
  - työtavat, -järjestys ja -vaiheet
  - työaikataulu
  - noudatettavat vaatimukset ja ohjeet.
- .3 Tekniseen työsuunnitelmaan liitetään mm. terveydelle vaarallisten aineiden suomenkieliset käyttöohjeet, tuoteselosteet ja käyttöturvallisuustiedotteet.
- .4 Suunnitelma toimitetaan tilaajan edustajalle viimeistään viikkoa ennen kyseisen työn aloittamista, ellei InfraRYL jakson 42000 muissa osissa ole annettu tarkentavia vaatimuksia.

InfraRYL 2006 Osa 3:n mukaiset laadunvarmistustoimenpiteet silloissa

.5 Jos työsuunnitelmassa poiketaan sillan rakennussuunnitelmasta, suunnitelma toimitetaan tilaajalle hyväksyttäväksi kaksi viikkoa ennen kyseisen työn aloittamista. Suunnitelmassa tulee esittää, miltä osin poiketaan suunnitelman vaatimuksista.

#### **42001.4.5 Laaduntarkastus**

##### **42001.4.5.1 Yleistä**

###### **Vaatimukset**

.1 Tämän InfraRYL jakson 42000 eri luvuissa on esitetty tavallisimpien rakennusaineiden, rakenneosien, rakenteiden sekä varusteiden ja laitteiden vaatimustenmukaisuuskokeiden minimimäärät.

.2 Jos vaatimustenmukaisuuskokeiden tulokset tai muut havainnot antavat perusteltua aiheutta epäillä laatuvaatimusten alituksia tapahtuneen, lisätään mittauksia ja testauksia niin paljon, että korjattavat kohdat rakenteessa ja/tai arvovähennykset voidaan määrittää.

##### **42001.4.5.2 Vaatimustenmukaisuuskokeiden suunnittelu ja tekeminen**

###### **Vaatimukset**

.1 Vaatimustenmukaisuuskokeet ja niiden tulosten esitystapa suunnitellaan siten, että tilaajan edustajalla on mahdollisuus toistaa suunniteltu tarkastus, testaus tai mittaus.

.2 Vaatimustenmukaisuuskokeet tehdään suunnitelma-asiakirjojen ja viiteasiakirjojen mukaisesti.

.3 Uusiin vaatimustenmukaisuuskokeisiin liittyvät tarkastus-, testaus- ja mittausmenetelmät hyväksytetään tilaajalla.

.4 Vaatimustenmukaisuuskokeen ajankohta ilmoitetaan tilaajan edustajalle viimeistään kaksi vuorokautta ennen mainittua koetta.

##### **42001.4.5.3 Vaatimustenmukaisuuskokeiden pöytäkirjat, yhteenvedot ja toteutumapiirustukset**

###### **Vaatimukset**

.1 Vaatimustenmukaisuuskokeen pöytäkirjaan kirjataan, täyttääkö rakenne, rakennusaine, varuste tai laite sille asetetut laatuvaatimukset.

.2 Pöytäkirjaan kirjataan ainakin seuraavat asiat:

- tilaaja
- kohde
- rakentaja tai valmistaja
- rakennusaineen, varusteen tai laitteen toimittaja
- ominaismitat ja toleranssit tai raja-arvot

InfraRYL 2006 Osa 3:n mukaiset laadunvarmistustoimenpiteet silloissa

- tarkastuksen tai mittauksen tulokset
- toleranssien ylitykset ja niiden sijainti
- laaditut laatupoikkeamaraportit
- tarkastuksen, testauksen tai mittauksen tekijä
- päiväys ja allekirjoitukset.

.3 Poikkeaman vaikuttaessa sillan ulkonäköön kirjataan, onko vaikutus merkittävä, vähäinen vai olematon.

### **Ohje**

Tarkastukset voivat olla silmämääräisiä, kuulohavaintoihin perustuvia tai erilaisin laittein tehtäviä tarkastuksia.

.4 Pöytäkirjojen avulla laaditaan toteutumapiirustukset sekä työ-, rakenneosa- ja siltakoh-  
taiset yhteenvetoreportit.

## **42001.4.6 Poikkeamasta ilmoittaminen**

### **Vaatimukset**

.1 Jokaisesta poikkeamasta ilmoitetaan tilaajan edustajalle heti kun se havaitaan. Ilmoitus voidaan tehdä ensin suullisesti ja vahvistaa kirjallisesti mahdollisimman pian.

### **Ohje**

Poikkeama saattaa liittyä rakennusaineeseen, rakenteeseen, varusteeseen tai laitteeseen. Tällöin puhutaan laatupoikkeamasta.

.2 Kaikista rakenteeseen jäävistä ja kaikista korjaustoimenpiteitä edellyttävistä laatupoik-  
keamista sekä kaikista toiminnallisista poikkeamista laaditaan poikkeamaraportti.

.3 Poikkeamaraportissa kuvataan tapahtunut poikkeama, siihen johtaneet syyt, ehdotus  
poikkeaman korjaamiseksi ja toimenpiteet sen toistumisen estämiseksi.

.4 Jos poikkeama ei ole korjattavissa tai sen korjaaminen aiheuttaa kohtuuttomia kustan-  
nuksia, esitetään raportissa syyt, joiden perusteella esitetään korjaamisesta luopumista.

.5 Poikkeamaraportti toimitetaan tilaajan edustajalle heti sen valmistuttua ja viimeistään  
viikkoa ennen mahdollisen korjaustyön aloittamista.

.6 Poikkeavuuden korjaamiseen tai puutteellisuuden poistamiseen tai peittämiseen ei saa  
ryhtyä ilman tilaajan edustajan lupaa.

InfraRYL 2006 Osa 3:n mukaiset laadunvarmistustoimenpiteet silloissa

#### **42001.4.7 Poikkeavuuden korjaaminen ja puutteellisuuden poistaminen**

##### **Vaatimukset**

- .1 Kaikki poikkeavuudet korjataan ja puutteellisuudet poistetaan, ellei tilaajan edustajan kanssa sovita arvon muutosmenettelystä.
- .2 Jokaisesta poikkeaman korjaamisesta tai puutteellisuuden poistamisesta laaditaan kirjallinen suunnitelma.
- .3 Suunnitelma toimitetaan tilaajan edustajalle viimeistään viikkoa ennen korjaukseen ryhtymistä.
- .4 Jos korjaus tai puutteellisuuden poistaminen muuttaa rakennetta tai sen toimintatapaa, toimitetaan suunnitelma tilaajan hyväksyttäväksi kaksi viikkoa ennen työn aloittamista.

##### **Ohje**

Korjauksista ja puutteellisuuksien poistamisesta esitetään tarkempia vaatimuksia ja ohjeita InfraRYL jakson 42000 muissa luvuissa. Korjaustöitä koskevia ohjeita on annettu myös SILKO:ssa.

##### **Viitteet**

- Siltojen korjausohjeet – SILKO.

- .5 Jos korjattu rakenne ei täytä alkuperäisiä vaatimuksia, laaditaan uusi poikkeamaraportti kohdan 42001.4.6 mukaisesti.

#### **42001.4.8 Vaatimustenmukaisuuden osoittaminen ja sillan laaturaportti**

##### **42001.4.8.1 Yleistä**

##### **Vaatimukset**

- .1 Urakoitsija on velvollinen osoittamaan kaikkien rakenteessa käytettyjen rakennusainesten, varusteiden ja laitteiden sekä rakenneosien ja valmiin rakenteen vaatimustenmukaisuuden.
- .2 Jos kysymyksessä on rakennusaineen, varusteen tai laitteen tarkastettu valmistus, voidaan sen vaatimustenmukaisuus yleensä osoittaa pakkauksiin, kuormakirjoihin ja / tai tuotteisiin tehtyjen merkintöjen avulla.

##### **Ohje**

Rakenneosien valmistuksen tapahtuessa valmistuslaitoksessa, jolla on Tiehallinnon hyväksymä ja toimiva laadunhallintajärjestelmä, tilaajan edustaja valvoo vaatimustenmukaisuusmittauksia pistokoeluonteisesti.

- .3 Jokaisesta siltatyöstä laaditaan jäljempänä esitettyjen vaatimusten ja ohjeiden mukainen sillan laaturaportti.
- .4 Sillan laaturaportti liitteineen luovutetaan tilaajan edustajalle.

InfraRYL 2006 Osa 3:n mukaiset laadunvarmistustoimenpiteet silloissa

.4 R Rautatiesillan laaturaportin tarkastaa ja allekirjoittaa tilaajan valvoja ja toimittaa sen arkistoitavaksi tilaajan arkistoon.

.5 Tarvittaessa tilaaja tekee pistokoeluonteisia tarkastuksia, testauksia ja mittauksia. Sillan vaatimustenmukaisuuden toteamisessa otetaan myös niiden tulokset huomioon.

#### **42001.4.8.2 Sillan laaturaportti**

##### **Vaatimukset**

.1 Sillan laaturaportissa, ks. julkaisu Sillan laaturaportti, laatimisohe, esitetään mm.

- sillan hoitoa, ylläpitoa ja käyttöä varten tarvittavat toteutumatiedot kuten sillan sijainti, hyödyllinen leveys, muoto, jännemitat, vapaa-aukot, kohtisuorat vapaa-aukot, kulkuaukon vapaa korkeus, kulkukorkeus ja rakenneosien kaltevuudet
- tiedot käytetyistä materiaaleista, varusteista ja laitteista
- yhteenveto siitä, täyttääkö silta ja sen osat sekä käytetyt rakennusaineet niille asetetut vaatimukset
- mahdolliset rakenteisiin jääneet poikkeavuudet ja vastaavat arvovähennykset
- arvio sillan rakennussuunnitelman laadusta urakoitsijan näkökulmasta
- arvio hankintamenettelyn laadusta.

##### **Ohje**

SILAVA-ohjelmistoa käytettäessä merkitään laaturaporttiin myös koko rakenteen laatuluku.

##### **Viitteet**

- Sillan laaturaportti. Laatimisohe.

.2 Sillan laaturaportin liitteeksi kootaan urakoitsijan laatimat tuotantosuunnitelmat liitteen, vaatimustenmukaisuuskokeiden pöytäkirjat, mahdolliset työ- ja rakenneosakohtaiset yhteenvetoraportit, toteumapiirustukset, muistiot, joihin mahdolliset pysyvien rakenteiden suunnitelmamuutokset on kirjattu, sekä poikkeamaraportit ja korjaussuunnitelmat.